

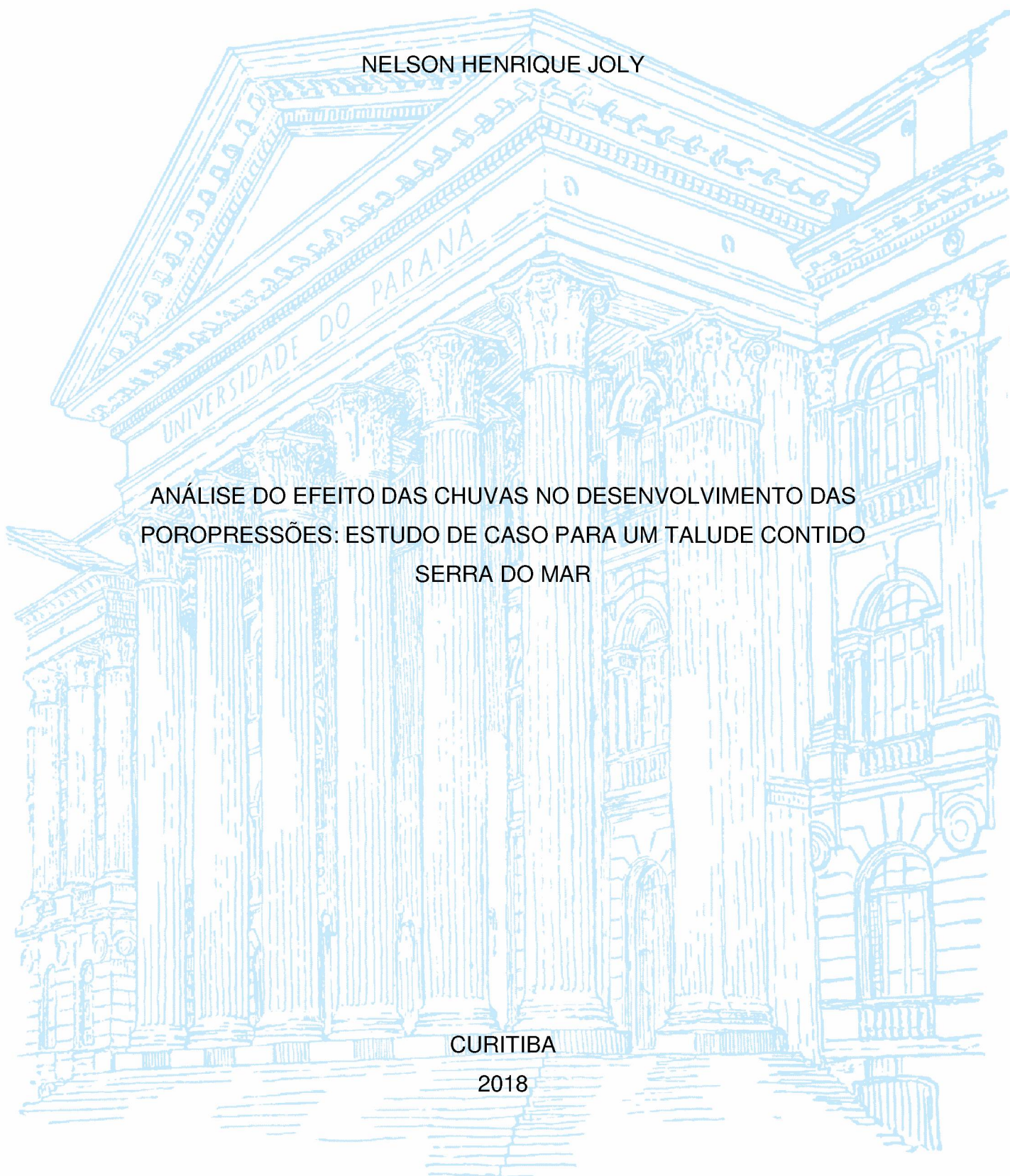
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NELSON HENRIQUE JOLY

ANÁLISE DO EFEITO DAS CHUVAS NO DESENVOLVIMENTO DAS
POROPRESSÕES: ESTUDO DE CASO PARA UM TALUDE CONTIDO
SERRA DO MAR

CURITIBA

2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NELSON HENRIQUE JOLY

ANÁLISE DO EFEITO DAS CHUVAS NO DESENVOLVIMENTO DAS
POROPRESSÕES: ESTUDO DE CASO PARA UM TALUDE CONTIDO NA
SERRA DO MAR

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil com Área de Concentração em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Vítor Pereira Faro

CURITIBA

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS/UFPR
BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

J75a

Joly, Nelson Henrique

Análise do efeito das chuvas no desenvolvimento das poropressões: estudo de caso para um talude contido na serra do mar / Nelson Henrique Joly. – Curitiba, 2018.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Vítor Pereira Faro.

1. Chuva. 2. Infiltração. 3. Instrumentação geotécnica. I. Universidade Federal do Paraná.
II. Faro, Vítor Pereira. III. Título.

CDD: 551



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
CONSTRUÇÃO CIVIL

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **NELSON HENRIQUE JOLY** intitulada: **ANÁLISE DO EFEITO DAS CHUVAS NO DESENVOLVIMENTO DAS POROPRESSÕES: ESTUDO DE CASO PARA UM TALUDE CONTIDO NA SERRA DO MAR**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

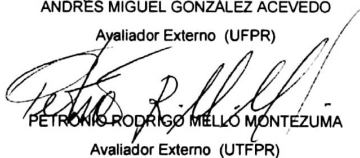
Curitiba, 22 de Junho de 2018.


VITOR PEREIRA FARO

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


ANDRÉS MIGUEL GONZÁLEZ ACEVEDO

Avaliador Externo (UFPR)


PETRONIO RODRIGO MELLO MONTEZUMA

Avaliador Externo (UFPR)


SIDNEI HELDER CARDOSO TEIXEIRA

Avaliador Interno (UFPR)

*Dedico este trabalho à todas as pessoas
que apesar das adversidades não
desistem dos seus sonhos e mantém sua
fé em Deus até as últimas consequências.*

AGRADECIMENTOS

Tenho convicção que se cheguei até aqui foi exclusivamente por Deus ter permitido. Sua presença divina tem me acompanhado ao longo dos anos me trazendo sabedoria, proteção e todo o prazer de desfrutar as maravilhas propiciadas pelo seu amor.

À minha vó Thereza pela cumplicidade e amor que demonstra em toda minha vida, sendo um espelho para mim em todos os sentidos.

À minha mãe Silvana Joly por cumprir o duplo papel em todos os sentidos da minha formação, pelo amor incondicional, nunca poupou esforços para me ver feliz.

À minha namorada Gabriela, pelo todo apoio e carinho que demonstrou ao longo dessa jornada que estamos juntos. Sem ela, os dias com certeza seriam mais cinzas.

À toda minha família pelas orações, apoio e carinho que sempre demonstraram por mim.

Ao professor e orientador Vitor Pereira Faro pelos conselhos e ombro amigo que encontrei durante ao mestrado. Com toda certeza, mais que um orientador, um amigo para vida toda.

Ao professor Petrônio Rodrigo Mello Montezuma por todo seu ensinamento, lealdade e humildade. Agradeço por ter me apresentado o caminho da geotecnia ainda na graduação.

Aos colegas de mestrado e amigos obtidos ao longo do período de UFPR, em especial ao Douglas C. Moscateli por ser um amigo que irei levar para o resto da vida, e Andrés González por ser um exemplo de esforço, dedicação e companheirismo.

Aos amigos que cultivo desde a graduação na UTFPR: Gilson Trentin, Bola, Azoia, Thomas e Lukas Dread. Obrigado por todo o companheirismo mesmo fora de Campo Mourão.

Aos membros da igreja que frequento pelas orações, carinho, apoio e conselhos que de alguma forma me ajudaram a ser quem eu sou. Em especial ao Pastor Paulino por toda sabedoria e dedicação para ensinar os caminhos de Deus.

Aos colegas de trabalho que me deram apoio nos momentos em que mais precisei, são eles: Marcos Brehm, Alexandre Padilha, Luiz H. Olavo e Bruno Henrique. Com certeza a amizade de vocês é um grande diferencial na minha vida.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC) e ao projeto de pesquisa por toda a estrutura disponibilizada.

À CAPES pelo auxílio financeiro.

“Eles encaram o trabalho como deve ser encarado, uma forma de ganhar a vida, e é do lazer que retiram, aí sim, a felicidade que a vida lhes permite desfrutar.”

(Bertrand Russel, 1935)

RESUMO

O transporte rodoviário no Brasil é o principal sistema logístico. As rodovias por sua vez, acabam cruzando regiões de encostas naturais da Serra do Mar, as quais se constituem basicamente por solos residuais e coluvionares o que pode ocasionar a obstrução devido algum movimento de massa. Os processos de instabilização estão normalmente associados a ocorrência de eventos pluviométricos de grandes intensidade e duração e demandam o desenvolvimento de estudos que busquem reduzir sua ocorrência ou ao menos suas consequências por meio de um melhor entendimento do processo. Diante desta temática esse trabalho teve como objetivo descrever, através de leitura de instrumentos (tensiômetros, piezômetros e pluviógrafo) a influência das chuvas no desenvolvimento das poropressões, especificamente, no estudo de caso de um trecho da pista sul da rodovia BR-101 no km 140+700m. As análises consistiram em selecionar eventos chuvosos e avaliar a influência de eventos pluviométricos nas variações dos perfis de poropressão. Em complemento a isto as pluviosidades observadas em campo para o desenvolvimento das frentes de umedecimento foram comparadas com um método teórico e as leituras dos tensiômetros, piezômetros e pluviógrafo caracterizadas baseando-se em critérios estatísticos buscando compreender os padrões de comportamento em diferentes períodos do ano.

Palavras Chave: Chuva, Infiltração, Instrumentação.

ABSTRACT

Road transport in Brazil is the main logistics system. The highways in turn end up crossing regions of natural slopes of the Serra do Mar, which are basically formed by residual soils and coluvionares which can cause the obstruction due to some mass movement. The processes of instabilization are usually associated with the occurrence of pluviometric events of great intensity and duration and require the development of studies that seek to reduce their occurrence or at least its consequences through a better understanding of the process. In view of this theme, the objective of this work was to describe the influence of rainfall on the development of pore water pressures by reading instruments (tensiometers, piezometers and rain gauges), specifically in the case study of a section of the southern runway of the BR-101 highway in km 140 + 700m. The analyzes consisted in selecting rainy events and evaluating the influence of rainfall events on the variations of the pore water pressure profiles. In addition to this the observed rainfall in the field for the development of wetting fronts was compared with a theoretical method and the tensiometers, piezometers and pluviometer readings were characterized based on statistical criteria seeking to understand the patterns of behavior in different periods of the year.

Keywords: Rainfall, Infiltration, Instrumentation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PERFIS DE SOLOS RESIDUAIS	22
FIGURA 2 – ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE UM COLÚVIO	23
FIGURA 3 – ELEMENTOS DE RUPTURA ROTACIONAL	26
FIGURA 4 – ELEMENTOS SOBRE RUPTURA TRANSLACIONAL	27
FIGURA 5 – MECANISMO DE COLAPSO POR SATURAÇÃO PELA BASE ..	28
FIGURA 6 – MECANISMO DE RUPTURA POR SATURAÇÃO PELO TOPO .	29
FIGURA 7 – ELEMENTOS DE SOLO NÃO SATURADO COM A FASE GASOSA CONTÍNUA.....	30
FIGURA 8 – MODELO ESQUEMÁTICO DE UMA CURVA DE RETENÇÃO...	32
FIGURA 9 – VARIAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA DE UMA ENCOSTA NÃO SATURADA COM A SUCÇÃO	35
FIGURA 10 – ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA DE SOLOS NÃO SATURADOS	36
FIGURA 11 – TAXA DE INFILTRAÇÃO EM UM TALUDE.....	39
FIGURA 12 – ESQUEMA ILUSTRATIVO DO PROCESSO QUE CAUSA ALTERAÇÕES NA POROPRESSÃO	40
FIGURA 13 – MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA NO SOLO EM RELAÇÃO A PROFUNDIDADE	41
FIGURA 14 – ILUSTRAÇÃO DO MODELO DE INFILTRAÇÃO DE GREEN AMPT	42
FIGURA 15 – ESQUEMA DE INFILTRAÇÃO TRANSIENTE EM UM SOLO NÃO SATURADO	44
FIGURA 16 – TÍPICO PERFIL DE POROPRESSÃO EM SOLOS SUJEITOS A CONDIÇÃO DE REGIME PERMANENTE	47
FIGURA 17 – TÍPICOS PERFIS DE POROPRESSÃO EM SOLOS NÃO SATURADOS PARA A CONDIÇÃO DE FLUXO TRANSIENTE	48
FIGURA 18 – POSSÍVEIS PERFIS DE POROPRESSÃO EM UM SOLO RESIDUAL	49
FIGURA 19 – COMPARAÇÃO NOS PERFIS DE POROPRESSÃO GERADOS PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE	51

FIGURA 20 – RELAÇÃO ENTRE A INTENSIDADE DE CHUVA E O FATOR DE SEGURANÇA EM UM TALUDE HOMOGÊNEO.....	52
FIGURA 21 – CHUVA CAPAZ DE SATURAR UM SOLO ACIMA DA PROFUNDIDADE ZW BASEADO NO MODELO DE GREEN-AMPT	53
FIGURA 22 – EFEITO DAS PROPRIEDADES DO SOLO NAS VARIAÇÕES DO FATOR DE SEGURANÇA COM O TEMPO: (a) SOLO $f_{10, -4}$ (b) SOLO $f_{50, -5}$ (c) SOLO $f_{100, -6}$	54
FIGURA 23 – CORRELAÇÃO ENTRE VARIAÇÃO DA SUCÇÃO E ACUMULADOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO.....	57
FIGURA 24 – TENSÍÔMETRO COMERCIAL	58
FIGURA 25 – ESQUEMA DE UM PIEZÔMETRO DE CORDA VIBRANTE	60
FIGURA 26 – PLUVIÓGRADO DE CAÇAMBAS BASCULANTES	61
FIGURA 27 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	62
FIGURA 28 – SEÇÃO ESQUEMÁTICA DO MORRO DO BOI NO KM 140 + 700 M	64
FIGURA 29 – PERFIL GEOLÓGICO GEOTÉCNICO DA ENCOSTA ESTUDADA	65
FIGURA 30 – CURVA DE UMEDECIMENTO DAS AMOSTRAS.....	67
FIGURA 31 – CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA	68
FIGURA 32 - PIEZÔMETRO DE CORDA VIBRANTE 4500S	68
FIGURA 33 – TENSÍÔMETRO 2725A E TRANSDUTOR 5301	69
FIGURA 34 – PLUVIÓGRAFO TB4/0,2MM.....	69
FIGURA 35 – CROQUI DE INSTALAÇÃO DOS INSTRUMENTOS.....	70
FIGURA 36 – SÉRIE HISTÓRICA DOS PIEZÔMETROS INSTALADOS NA ILHA 01	72
FIGURA 37 – SÉRIE HISTÓRICA DOS TENSÍOMETROS INSTALADOS NA ILHA 01	72
FIGURA 38 – SÉRIE HISTÓRICA DOS PIEZOMETROS INSTALADOS NA ILHA 02	73
FIGURA 39 – SÉRIE HISTÓRICA DOS TENSÍOMETROS INSTALADOS NA ILHA 02	73
FIGURA 40 – SÉRIE HISTÓRICA DOS TENSÍOMETROS INSTALADOS NA ILHA 03	74

FIGURA 41 – SÉRIE HISTÓRICA DO PLUVIÓGRAFO INSTALADO NO LOCAL DE ESTUDO	75
FIGURA 42 – FLUXOGRAMA DA PESQUISA.....	76
FIGURA 43 – TÍPICO PERFIL PERÍODO SECO E CHUVOSO	78
FIGURA 44: PLUVIOSIDADE ACUMULADA MENSAL	80
FIGURA 45 DIAS COM REGISTRO DE PRECIPITAÇÃO.....	81
FIGURA 46: INTENSIDADE MÉDIA MENSAL.....	82
FIGURA 47: PRECIPITAÇÃO MÁXIMA DIÁRIA	82
FIGURA 48: PRECIPITAÇÃO MÁXIMA HORÁRIA.....	83
FIGURA 49: VALORES MÁXIMO, MÍNIMOS E MÉDIAS DE ACUMULADOS MENCIAIS	84
FIGURA 50: COEFICIENTE DE VARIAÇÃO E DESVIO PADRÃO DOS REGISTROS MENCIAIS	85
FIGURA 51 – VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIAS REGISTRADOS DURANTE O OUTONO NA ILHA 03.....	86
FIGURA 52 - VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIAS REGISTRADOS DURANTE O INVERNO NA ILHA 03	87
FIGURA 53 - VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIAS REGISTRADOS DURANTE A PRIMAVERA NA ILHA 03.....	88
FIGURA 54 - VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIAS REGISTRADOS DURANTE O VERÃO NA ILHA 03.....	89
FIGURA 55 - VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIAS REGISTRADOS DURANTE O OUTONO NA ILHA 02.....	89
FIGURA 56 - VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIAS REGISTRADOS DURANTE O INVERNO NA ILHA 02	90
FIGURA 57 - VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIAS REGISTRADOS DURANTE A PRIMAVERA NA ILHA 02.....	91
FIGURA 58 - VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIAS REGISTRADOS DURANTE O VERÃO NA ILHA 02.....	92
FIGURA 59 - VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIAS REGISTRADOS DURANTE O OUTONO NA ILHA 01	93
FIGURA 60 - VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIAS REGISTRADOS DURANTE O INVERNO NA ILHA 01	94

FIGURA 61 - VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIAS REGISTRADOS DURANTE A PRIMAVERA NA ILHA 01.....	95
FIGURA 62 - VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIAS REGISTRADOS DURANTE O VERÃO NA ILHA 01.....	96
FIGURA 63 – RESUMO DOS REGISTROS PLUVIOMÉTRICOS. DO EVENTO 1	100
FIGURA 64 – PERFIS DE POROPRESSÃO GERADOS NO EVENTO 1	101
FIGURA 65 – CURVAS COMPARATIVAS ENTRE EQUAÇÃO TEÓRICA E DADOS DE CAMPO	102
FIGURA 66 - RESUMO DOS REGISTROS PLUVIOMÉTRICOS. DO EVENTO 2	103
FIGURA 67 - PERFIS DE POROPRESSÃO GERADOS NO EVENTO 2.....	104
FIGURA 68 – CURVAS COMPARATIVAS ENTRE EQUAÇÃO TEÓRICA E DADOS DE CAMPO	106
FIGURA 69 - RESUMO DOS REGISTROS PLUVIOMÉTRICOS DO EVENTO 3	107
FIGURA 70 - PERFIS DE POROPRESSÃO GERADOS NO EVENTO 3.....	108
FIGURA 71 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE EQUAÇÃO TEÓRICA E DADOS DE CAMPO	110
FIGURA 72 - RESUMO DOS REGISTROS PLUVIOMÉTRICOS. DO EVENTO 4	111
FIGURA 73 - PERFIS DE POROPRESSÃO GERADOS NO EVENTO 4.....	112
FIGURA 74 - RESUMO DOS REGISTROS PLUVIOMÉTRICOS. DO EVENTO 4	113
FIGURA 75 - PERFIS DE POROPRESSÃO GERADOS NO EVENTO 4.....	114
FIGURA 76 - GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE EQUAÇÃO TEÓRICA E DADOS DE CAMPO	115
FIGURA 77 - GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE EQUAÇÃO TEÓRICA E DADOS DE CAMPO	116

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - MECANISMOS DEFLAGRADORES DE MOVIMENTOS.....	25
QUADRO 2– PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	66
QUADRO 3– INTERVALO DOS COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE	68
QUADRO 4– PROFUNDIDADE DE INSTALAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS...	71
QUADRO 5 – CLASSIFICAÇÃO DA INTENSIDADE DAS CHUVAS.....	75
QUADRO 6 – EVENTOS DE CHUVAS COM INTENSIDADE CONSIDERADA MUITO FORTE.....	97
QUADRO 7 – ESCOLHA DOS EVENTOS DE CHUVAS COM INTENSIDADE MUITO FORTE PARA SEREM UTILIZADOS NAS ANÁLISES	98
QUADRO 8 – RESUMO DOS EVENTOS UTILIZADOS NAS ANÁLISES	98
QUADRO 9 – PARÂMETROS UTILIZADOS NO CÁLCULO DA INTENSIDADE MÍNIMA PARA O DIA 09/02/2013.....	102
QUADRO 10– PARÂMETROS UTILIZADOS NO CÁLCULO DA INTENSIDADE MÍNIMA PARA O DIA 17/08/2014.....	105
QUADRO 11– PARÂMETROS UTILIZADOS NO CÁLCULO DA INTENSIDADE MÍNIMA PARA O DIA 04/02/2015.....	109
QUADRO 12 - PARÂMETROS UTILIZADOS NO CÁLCULO DA INTENSIDADE MÍNIMA PARA O DIA 26/03/2016.....	114
QUADRO 13 - PARÂMETROS UTILIZADOS NO CÁLCULO DA INTENSIDADE MÍNIMA PARA O DIA 13/04/2016.....	115

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	20
2.1	OBJETIVO GERAL	20
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
3.1	SOLOS RESIDUAIS.....	22
3.2	SOLOS COLUVIONARES.....	23
3.3	MECANISMOS DE RUPTURA EM TALUDES	24
3.3.1	RUPTURA ROTACIONAL.....	25
3.3.2	RUPTURA TRANSLACIONAL	26
3.4	PROPRIEDADES DOS SOLOS NÃO SATURADOS	29
3.4.1	SUCÇÃO	30
3.4.2	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM SOLOS.....	33
3.5	A ÁGUA NO SOLO	36
3.5.1	INFILTRAÇÃO	38
3.5.2	MODELOS CONCEITUAIS DE INFILTRAÇÃO.....	41
3.5.3	SOLUÇÕES NUMÉRICAS E ANALÍTICAS.....	46
3.6	FATORES QUE INFLUENCIAM NOS ESCORREGAMENTOS INDUZIDOS PELA CHUVA.....	50
3.6.1	PROPRIEDADES DO SOLO.....	50
3.6.2	CARACTERÍSTICAS DA CHUVA	52
3.7	INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO	55
3.8	INTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA	57
3.8.1	TENSIÔMETROS.....	57
3.8.2	PIEZÔMETROS	59
3.8.3	PLUVIÓGRAFOS	61

4	MATERIAIS E MÉTODOS	62
4.1	ÁREA DE ESTUDO	62
4.1.1	LOCALIZAÇÃO.....	62
4.1.2	ASPECTOS GEOLÓGICOS	63
4.1.3	ASPECTOS GEOTÉCNICOS.....	64
4.1.4	PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	66
4.1.5	CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA E COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE.....	66
4.1.6	INSTRUMENTOS INSTALADOS	68
4.1.7	SÉRIE HISTÓRICA DOS INSTRUMENTOS INSTALADOS	71
4.1.8	METODOLOGIA DA PESQUISA	76
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
5.1	CARACTERIZAÇÃO PLUVIOMÉTRICA	80
5.2	CARACTERIZAÇÃO PIEZOMÉTRICA.....	85
5.2.1	CARACTERIZAÇÃO DA ILHA 03	86
5.2.2	CARACTERIZAÇÃO DA ILHA 02	89
5.2.3	CARACTERIZAÇÃO DA ILHA 01	93
5.4	INFLUÊNCIA DAS CHUVAS ANTECEDENTES NAS RESPOSTAS PIEZOMÉTRICAS.....	96
5.3.1	EVENTO 1.....	99
5.3.2	EVENTO 2.....	103
5.3.3	EVENTO 3.....	106
5.3.4	EVENTO 4.....	110
6	CONCLUSÕES	117
	REFERÊNCIAS	119

1 INTRODUÇÃO

Problemas relacionados às encostas acarretam diversas consequências para a sociedade, tanto econômicos quanto à perda de vidas humanas. A variabilidade e dinâmica presentes em encostas naturais contidas em regiões de Serra do Mar, bem como o entendimento do seu comportamento após intervenções antrópicas, tais como a construção de rodovias, representam um desafio na avaliação de riscos e mapeamento de áreas suscetíveis à escorregamentos. Durante o verão, frentes frias que se originam na região Antártica atravessam o Oceano Atlântico num ritmo cíclico de aproximadamente uma frente por semana. Ao encontrar-se com as massas quentes tropicais geram fenômenos de instabilidade atmosférica intensa, os quais frequentemente resultam em ocorrência de precipitações capazes de provocar escorregamentos e outros problemas como enchentes (JOLY *et. al.*, 2016).

Conforme Rahardjo *et. al.* (2008) as mudanças na distribuição dos perfis de poropressão estão associadas a estabilidade de taludes, envolvendo solos não saturados, que são diretamente afetados pelos agentes externos como: infiltração da água das chuvas, evaporação e evapotranspiração. Rupturas induzidas através de eventos pluviométricos são basicamente causadas pela infiltração das águas das chuvas (e.g. Brand, 1984; Lim *et al.*, 1996; Crosta, 1998; Rahardjo *et al.*, 2001).

A temática de abordar os principais conceitos que correlacionam pluviosidade com escorregamentos são apresentadas em diversos trabalhos ao redor do mundo, como Lumb (1975) que desenvolveu a correlação da precipitação com deslizamentos para a cidade de Hong Kong, Govi e Sorzana (1980), que estudaram os escorregamentos e sua relação com chuvas para o noroeste da Itália, Brand *et. al.* (1985) estudaram os solos e a influência das chuvas para região de Hong Kong, Pedrosa (1994) onde estudou e estabeleceu um comparativo entre as propostas de precipitação e escorregamentos das cidades de Hong Kong e do Rio de Janeiro, Silva Junior (1991) que estuda deslizamentos devido à precipitação ocorridos na

região da Serra do Mar, ao longo da BR 101, Brugger e Lacerda (1997) que apresentaram estudos de monitoramento de encostas e sua movimentação através da precipitação pluviométrica, IDE (2005) que apresenta para a região de Campinas um estudo de correlação entre precipitação e deslizamentos;

No Brasil, a precipitação é o fator meteorológico de maior contribuição para ocorrência de deslizamentos e alagamentos nas grandes áreas urbanas, devido à ocupação desordenada dos morros e encostas, em sua maioria por população de baixa situação econômica, formalizando as favelas. O grande número de estudos direcionados aos estados de São Paulo e Rio de Janeiro mostram a preocupação da sociedade em minimizar as perdas, conjugando métodos e critérios às previsões meteorológicas, possibilitando assim a prevenção dos deslizamentos. (DORSI, 2011)

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta dissertação consiste em descrever, através de leitura de instrumentos (tensiômetros, piezômetros e pluviógrafo), a influência das chuvas no desenvolvimento das poropressões, especificamente, no estudo de caso de um trecho da pista sul da rodovia BR-101/SC no km 140+700m

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar as leituras das poropressões nas profundidades dos instrumentos instalados e os registros pluviométricos através de critérios estatísticos;
- Avaliar a influência de eventos pluviométricos na variação dos perfis de poropressões;
- Comparar o avanço da frente de umedecimento a partir de pluviosidades acumuladas *in situ* com métodos teóricos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Brasil possui clima tropical e grandes extensões de encostas que apresentam elevada suscetibilidade a movimentos de massa próximo a diversas cidades brasileiras. Diversos são os fatores que levam a acidentes relacionados aos movimentos dessas massas de solo, podendo ser de origem natural ou antrópica.

Nos maciços terrosos em regiões tropicais, como é o caso do Brasil, a condição não saturada é muito significativa. Os fluidos nos vazios entre as partículas sólidas condicionam os fenômenos relacionados ao estado não saturado e modificam o comportamento mecânico, volumétrico e hidráulico do solo (CARVALHO *et al.*, 2015).

Conforme Almeida e Carneiro (1998), a Serra do Mar é um conjunto de escarpas festonadas com cerca de 1000 km de extensão. Ela se estende desde o Estado do Rio de Janeiro até o norte do Estado de Santa Catarina, onde deixa de existir como unidade orográfica de borda escarpada de planalto, desfeita que se acha em cordões de serras paralelas e montanhas isoladas drenadas diretamente para o mar, sobre tudo pela bacia do rio Itajaí. No Paraná, configura uma cadeia de montanhas com cimos elevados até 1800 m de altitude. Em São Paulo, impõe-se como típica borda de planalto, frequentemente nivelada pelo topo em altitudes de 800 a 1200 m. Na região centro oriental do Rio de Janeiro, apresenta-se como montanha constituída por bloco de falhas inclinado para noroeste em direção ao rio Paraíba do Sul com vertentes abruptas voltadas para a Baixada Fluminense

Neste capítulo foram discutidos os conceitos relacionados a solos residuais e coluvionares, solos não saturados, a dinâmica da água no solo, instrumentação e os mecanismos de ruptura e estabilização inerentes as encostas.

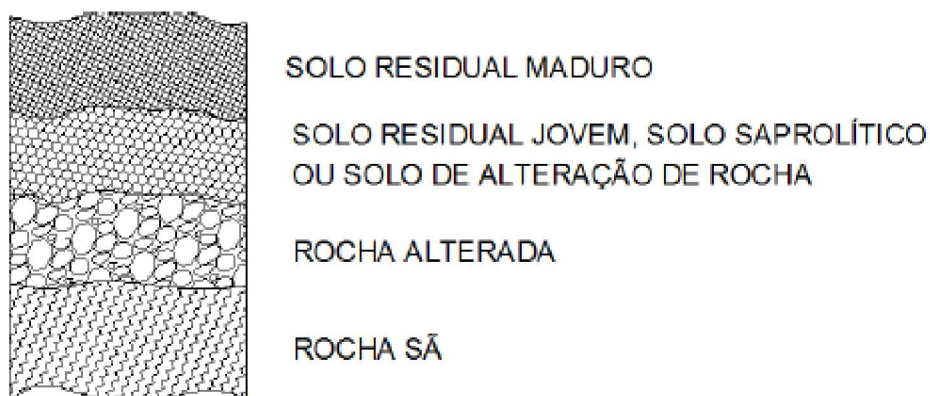
3.1 SOLOS RESIDUAIS

Segundo Blight (1997), o solo residual é um material terroso resultante do processo de intemperismo da rocha no local e que não tenha havido nenhum tipo de transporte em relação a sua posição original.

É de extrema importância o conhecimento da rocha que originou o solo residual, uma vez que, a rocha formadora afetará as propriedades do solo (e.g composição granulométrica, plasticidade, grau de intemperismo, planos de fraqueza, fraturas, características estruturais).

Conforme Gerscovich (2012), o aparecimento de diferentes horizontes em um perfil de solo residual se deve ao processo de intemperismo evoluindo da superfície até as regiões mais profundas. A FIGURA 1 apresenta um perfil típico de solo residual

FIGURA 1 – PERFIS DE SOLOS RESIDUAIS



FONTE: GERSCOVICH (2012)

A partir da FIGURA 1, é possível perceber quatro horizontes típicos em um solo residual, que são descritos abaixo:

- Solo residual: alto grau de intemperismo, sem características remanescentes da rocha que lhe deu origem;
- Solo de alteração de rocha: apresenta um menor grau de intemperismo que a camada anterior, nesta camada já é possível observar características estruturais e minerais da rocha que lhe deu origem;

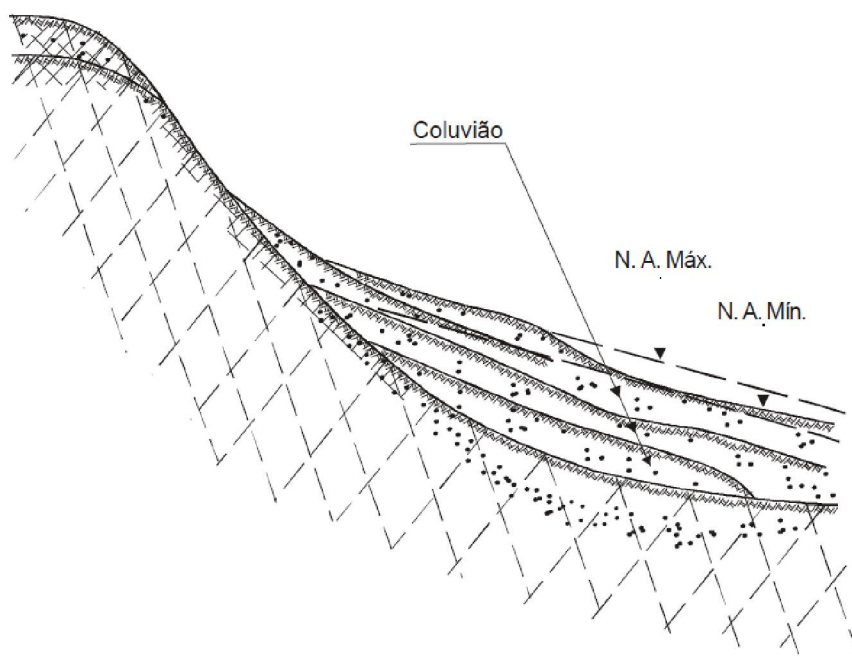
- Rocha alterada: identificada apenas pelo avanço da ação do intemperismo ao longo das fraturas ou regiões com minerais menos resistentes;
- Rocha sã: rocha intacta, sem nenhuma influência do intemperismo sobre a mesma.

3.2 SOLOS COLUVIONARES

Os solos coluvionares podem se originar em taludes com diversas formações geológicas. Sua ocorrência está associada a horizontes de solo residual e blocos de rocha originários de uma maciço rochoso fraturado. Rochas e partículas de solo são transportadas por ação da gravidade e da erosão depositando-se ao longo da base da encosta (MASSAD, 2010)

Conforme Deere e Patton (1971) O modo de ruptura que agiu sobre a massa de solo está diretamente associada a formação do solo coluvionar. O movimento lento dessas encostas é substituído por movimentos rápidos após períodos de chuva. A FIGURA 2 apresenta o processo de formação de um colúvio, devido a vários escorregamentos que ocorreram ao longo do tempo.

FIGURA 2 – ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE UM COLÚVIO



FONTE: ADAPTADO DE DEERE E PATTON (1971)

A origem de muitos solos coluvionares está ligada a rupturas de massas de solo que ocorreram em níveis superiores ao sopé do talude. O conceito de solo coluvionar cinge escorregamentos de fragmentos de solo e rocha, assim como, vários depósitos de um talude (DEERE E PATTON, 1971).

3.3 MECANISMOS DE RUPTURA EM TALUDES

Diversos sistemas foram criados para classificar os movimentos de massa. As classificações normalmente são baseadas na associação dos seguintes fatores: gênese do material instabilizado; geometria da massa movimentada; modalidade de deformação do movimento; velocidade, direção e sazonalidade nos escorregamentos; estrutura, textura e conteúdo de água dos materiais (AUGUSTO FILHO *et al.*, 1998).

Conforme exposto por Guidicini e Nieble (1984), para que ocorra um escorregamento é necessário que a relação entre a resistência média ao cisalhamento e as tensões médias de cisalhamento na superfície de ruptura tenham decrescido de um valor maior que 1 até a unidade no instante do escorregamento.

No Brasil, os estudos realizados principalmente na Serra do Mar, visando conhecer melhor os agentes deflagradores de instabilidade, foram iniciados após os acontecimentos nos Morros de Santos, na cidade do Rio de Janeiro e regiões vizinhas (GERSCOVICH, 2012). No entanto, casos semelhantes ainda são registrados e estudados. A partir deles, dadas suas semelhanças, podem ser citadas algumas causas deflagradoras.

No Brasil nas últimas décadas, vários casos de ruptura por escorregamento em solos não saturados foram retroanalizados e os principais mecanismos deflagradores foram identificados e estão resumidos no QUADRO

QUADRO 1 - MECANISMOS DEFLAGRADORES DE MOVIMENTOS

Variação das tensões cisalhantes mobilizadas	
Mecanismos	Ação
Ação antrópica	Execuções de cortes
	Construção de estruturas
	Acúmulo natural de material (depósitos)
Perda de resistência ao cisalhamento	
Mecanismos	Ação
Variação na pressão de água nos poros devido ao aumento de umidade	Infiltração interna por ruptura de tubulação de água ou esgoto (<i>e.g.</i> Campos <i>et. al.</i> , 2005 e 2008; Ferreira <i>et al.</i> , 2005)
	Redução dos níveis de sucção (<i>e.g.</i> Futai <i>et. al.</i> , 2005; Calle, 2000; Santos <i>et. al.</i> , 2007; Ferreira e Lima, 2005, Salles <i>et. al.</i> , 2012)
	Geração de fluxo preferencial através de fraturas do embasamento rochoso (<i>e.g.</i> Gerscovich <i>et. al.</i> , 2006, 2008 e 2011)

FONTE: ADAPTADO DE CARVALHO *et al.* (2015)

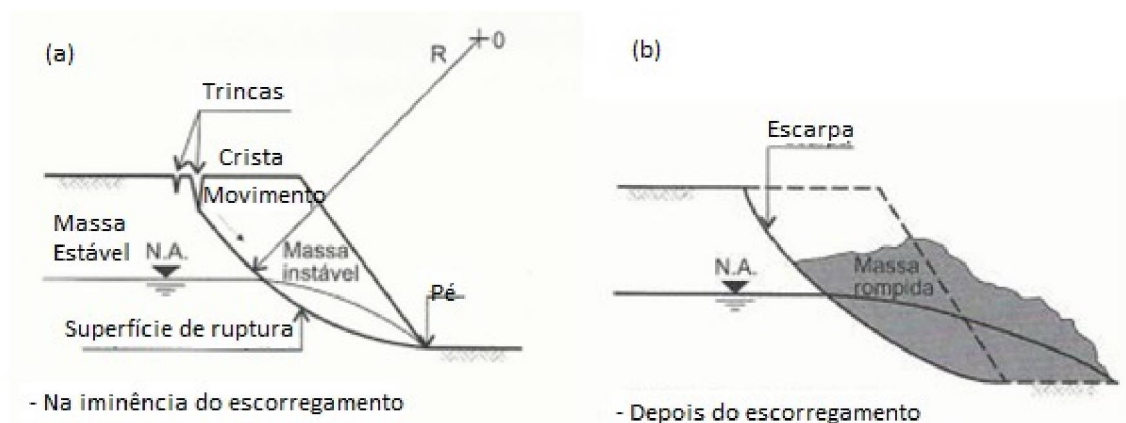
3.3.1 RUPTURA ROTACIONAL

Este movimento de massa é caracterizado por possuir uma superfície de ruptura curva. A maioria dos registros desse tipo de escorregamento estão relacionados à combinação de causas antrópicas e infiltração de água (BARATA, 1969).

Dependendo das características geológicas os movimentos podem apresentar as seguintes características: escarpas de topo, material acumulado

no pé da encosta, fendas transversais no material mobilizado (GEORIO, 2014). A FIGURA 3 apresenta um exemplo de escorregamento rotacional, é possível na FIGURA 3 (a) os elementos na iminência do escorregamento e na FIGURA 3 (b) os elementos de ruptura após o escorregamento.

FIGURA 3 – ELEMENTOS DE RUPTURA ROTACIONAL



FONTE: ADAPTADO DE GEORIO (2014)

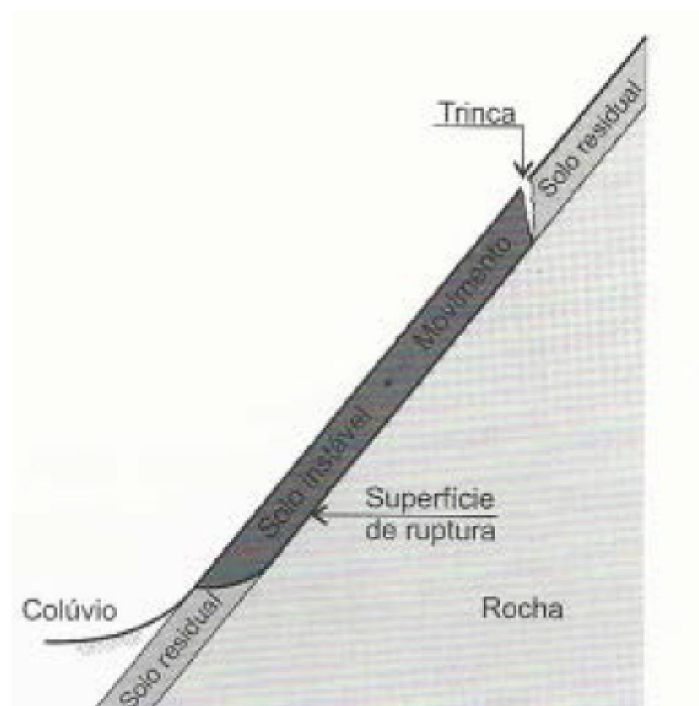
Conforme Wolle (1988), é comum após a ruptura que as árvores continuem em pé ou com pequeno declive devido a pequena deformação que a massa rompida apresenta durante o processo de instabilização.

3.3.2 RUPTURA TRANSLACIONAL

Segundo GEORIO (2014), este movimento possui uma superfície de ruptura plana, onde a massa instabilizada se desloca sobre rocha ou camada resistente podendo se deslocar também sobre foliações ou descontinuidades. Os escorregamentos desse tipo são compridos e rasos, movimentando na grande maioria das vezes, não mais que 5,0 metros de espessura de solo.

A superfície de escorregamento começa a aparecer geralmente no topo da área sujeita à movimentação, na forma de uma linha de destaque aproximadamente circular. A presença de um obstáculo ao movimento provoca a formação de um embarrigamento característico que pode ser visto na FIGURA 4 (GUIDICINI E NIEBLE, 1984).

FIGURA 4 – ELEMENTOS SOBRE RUPTURA TRANSLACIONAL



FONTE: GEORIO (2014)

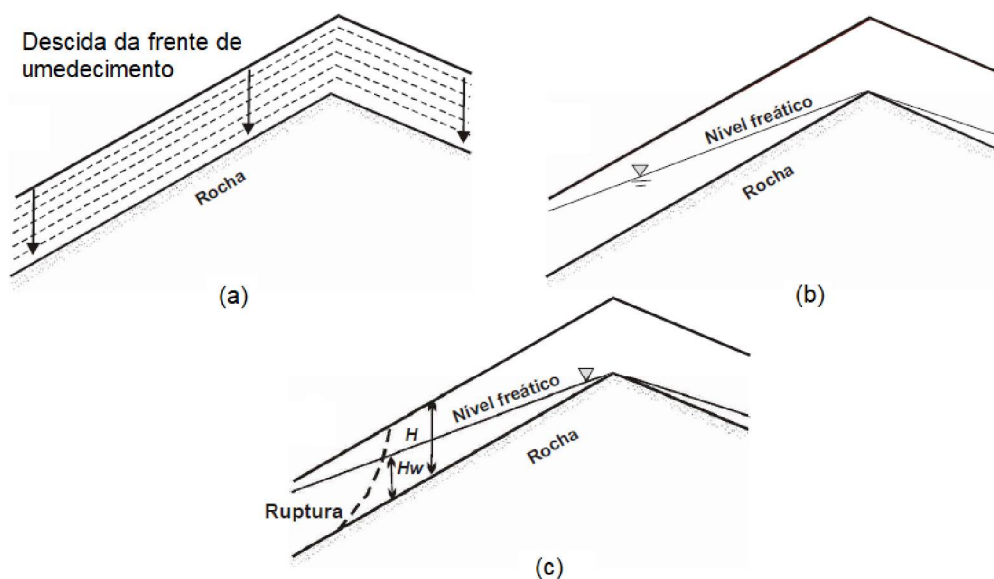
Na Serra do Mar se constitui o grande palco de ocorrência desse fenômeno possuindo perfis retilíneos onde os horizontes acompanham a própria topografia e a espessura de solo possui pequenas espessuras. (WOLLE, 1988).

Conforme Enoki *et al.* (1999), os escorregamentos do tipo translacional podem ser deflagrados por mecanismos de saturação pela base ou pelo topo do talude.

O mecanismo de saturação pela base ocorre geralmente quando dois materiais com propriedades hidrogeológicas diferentes estão sobrepostos (solo mais permeável sob solos menos permeáveis, contato rocha-solo). Após determinado tempo posterior ao início da frente de saturação do maciço, há a elevação do lençol freático casado à elevação da pressão neutra e a consequente instabilização do maciço (AHREDNT, 2005).

Basicamente, este tipo de ruptura ocorre em uma sequência sistemática descrita por Enoki *et al.* (1999): Infiltração de água pela superfície e resultante descida da frente de saturação (FIGURA 5 (a)) formando um lençol freático que se eleva continuamente (FIGURA 5(b)) até um ponto onde ocorre a perda de resistência ao cisalhamento do solo, ocorrendo o seu colapso (FIGURA 5 (c)).

FIGURA 5 – MECANISMO DE COLAPSO POR SATURAÇÃO PELA BASE

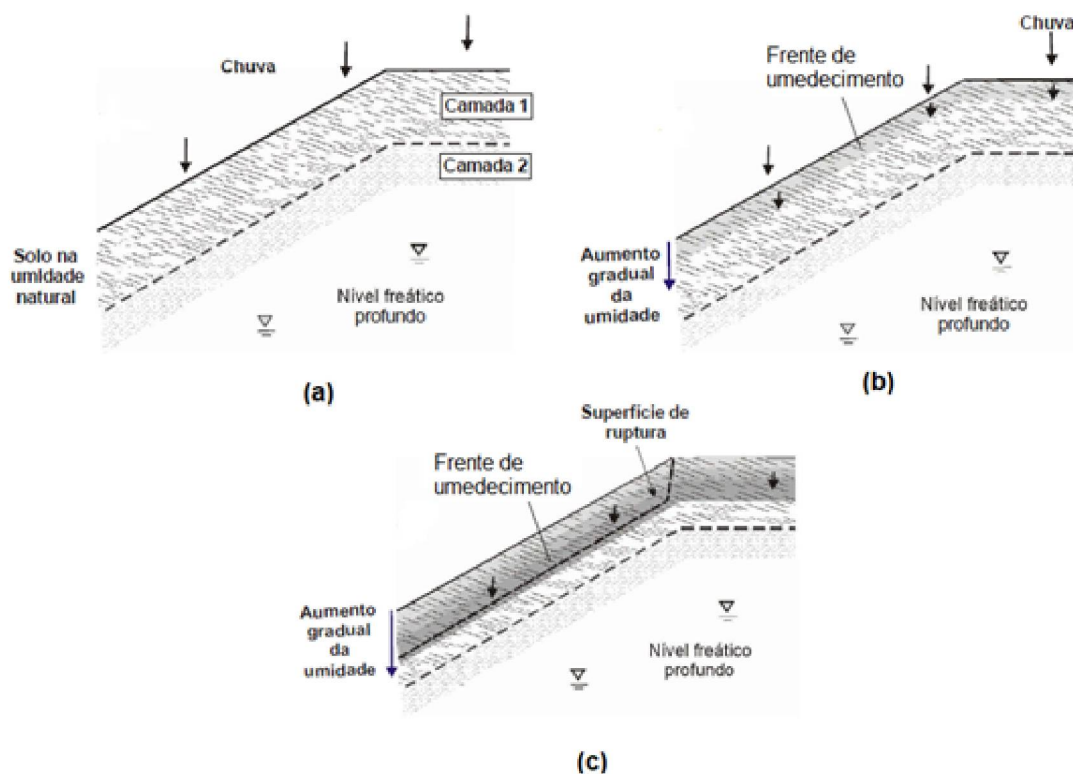
FONTE: ADAPTADO DE ENOKI *et al.* (1999)

A ruptura pela saturação pelo topo é resultante da redução da sucção existente em solos não saturados. Essa sucção é reduzida devido a infiltração contínua da água, a qual eleva a umidade do solo até a diminuição significativa da sucção (ENOKI *et al.*, 1999).

A desestabilização do maciço pode acontecer antes mesmo da saturação total do maciço, ou suceder a saturação do maciço até um certo ponto, fazendo com que a ruptura ocorra para uma certa profundidade crítica para a estabilidade da encosta. Este mecanismo está, em geral, associado a encostas muito íngremes onde a estabilidade do maciço depende principalmente da coesão do solo incrementada pelas forças de sucção as quais garantem a estabilidade da encosta (AHRENDT, 2005).

A FIGURA 6 ilustra o mecanismo de ruptura por saturação pelo topo. Com o início da chuva e consequente infiltração das águas pluviais (FIGURA 6 (a)) ocorre o avanço gradual da frente de umedecimento e consequentemente há o aumento da umidade nas camadas mais inferiores (FIGURA 6 (b)) até que ocorre a desestabilização do maciço (FIGURA 6 (c)).

FIGURA 6 – MECANISMO DE RUPTURA POR SATURAÇÃO PELO TOPO



FONTE: ADAPTADO DE AHRENT (2005)

Diversos estudos mostram que a água no interior da encosta não advém apenas da água proveniente das chuvas (e.g. Johnson *et. al.* (1990); Montgomery *et. al.* (1997); Leroueil (2001)), mas também de outras fontes e direções que não sejam as de infiltração vertical. A água dentro do maciço pode ascender de fraturas e também advir da distribuição progressiva entre as camadas com diferentes características de permeabilidade do maciço gerando fluxo em diversas direções.

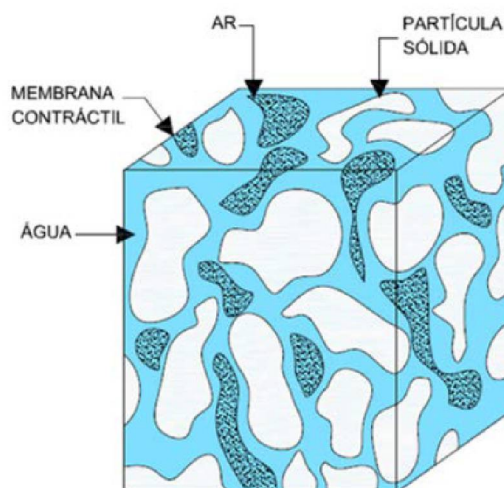
3.4 PROPRIEDADES DOS SOLOS NÃO SATURADOS

A visão da mecânica dos solos clássica para soluções de problemas de engenharia baseia-se em solo constituído de uma estrutura bifásica, partículas sólidas e água (VAN ONSELEN, 2016).

Estudos envolvendo solos não saturados são de interesse da mecânica dos solos por existirem diversas obras de engenharia envolvendo o

comportamento deste tipo de solo. A não saturação faz com que o estado de tensões seja diferente, devendo, então, ser considerada a influência de outras variáveis no comportamento dos solos não saturados. Os elementos de um solo não saturado podem ser visualizados na FIGURA 7.

FIGURA 7 – ELEMENTOS DE SOLO NÃO SATURADO COM A FASE GASOSA CONTÍNUA



FONTE: ADAPTADO DE FREDLUND E MORGENSTERN (1993)

Além das fases sólida, líquida e gasosa; Fredlund e Morgenstern (1993) sugerem a existência de uma quarta fase, a interface ar-água, denominada membrana contrátil. A principal característica desta membrana é a possibilidade de exercer uma tensão de tração nos materiais contínuos, denominada tensão superficial. Essa tensão superficial faz com que a membrana contrátil se comporte como uma membrana elástica. Quando a fase de ar é contínua, a membrana contrátil interage com as partículas sólidas, influenciando no comportamento mecânico dos solos.

3.4.1 SUCÇÃO

O comportamento mecânico do solo não saturado é influenciado pela sucção, pois em época de estiagem, o solo encontra-se em um estado não saturado com pressões negativas; o que aumenta a resistência ao cisalhamento. Em épocas de chuvas, esse material passa ao estado de saturação, perdendo a sucção e reduzindo, assim, sua resistência ao cisalhamento. Nesses ciclos de

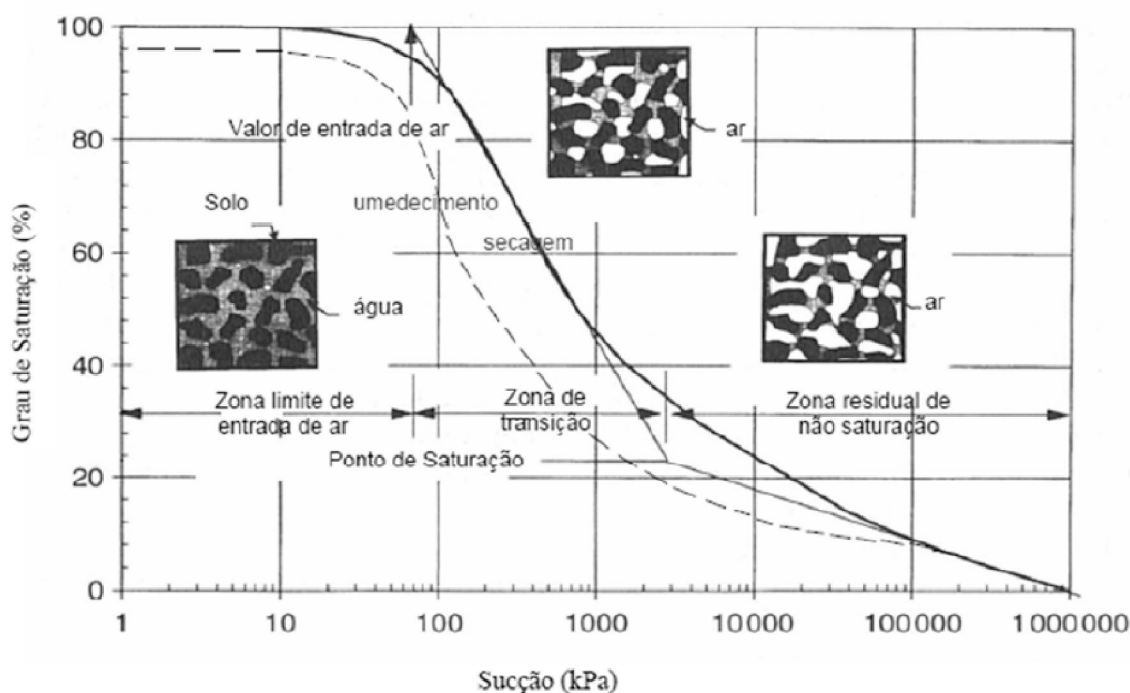
umedecimento e secagem, os solos apresentam variações volumétricas e de resistência. Conforme Marinho (1997), define-se a sucção do solo com a pressão isotrópica da água intersticial que dependendo das condições da água e das condições ambientais faz com que o sistema água/solo absorva ou perca água, aumentando ou reduzindo o grau de saturação. Quando ocorre a infiltração da chuva, a poropressão da água aumenta, tendendo a valores positivos.

A sucção é dividida em duas parcelas: a sucção mátrica que está relacionada com a estrutura e composição do solo e que tende a desaparecer com a saturação, sendo definida como a diferença entre a pressão de ar e a pressão de água nos vazios; e a sucção osmótica, relacionada à concentração química da água no solo. A relação entre a sucção e a quantidade de água no solo é mostrada com a curva característica de sucção do solo. Geralmente a quantidade de água é expressa pelo teor de umidade gravimétrico, teor de umidade volumétrico ou grau de saturação. Para estudos relacionados a dinâmica de água voltada a obtenção da condutividade hidráulica não saturada, no entanto, é comum considerar o potencial total como relacionado diretamente ao componente matricial, ou seja, o potencial mátrico do solo ou sucção (CARVALHO *et al.*, 2015)

A maneira mais comumente utilizada para representar as características do potencial mátrico é através da curva de retenção, que representa a relação entre o potencial mátrico e o teor de umidade ou grau de saturação do solo. Esta curva ainda pode ser chamada de curva de sucção ou curva característica e segundo Sillers e Fredlund (2001) ela pode ser vista como uma função sigmoideal contínua que descreve a capacidade de um solo de reter ou estocar a água quando submetida a várias sucções

A curva de retenção fornece uma ferramenta conceitual e interpretativa com a qual o comportamento dos solos não saturados pode ser entendido. Enquanto o solo muda de um estado saturado para o estado não saturado, a distribuição das fases do solo muda enquanto o estado de tensões varia (VANAPALI E FREDLUND, 2001). A FIGURA 8 apresenta o modelo esquemático de uma curva de retenção.

FIGURA 8 – MODELO ESQUEMÁTICO DE UMA CURVA DE RETENÇÃO



FONTE: ADAPTADO DE VANAPALLI *et al.* (2001)

Conforme Victorino (2015), alguns pontos da FIGURA 8 merecem destaque:

- Valor de umidade residual: é associado a altos valores de sucção. O acréscimo de sucção não tende a reduzir este valor de umidade.
- Valor de umidade de saturação: é teoricamente igual à porosidade do solo, isto é, todos os vazios estão preenchidos com água
- Valor de entrada de ar: é o valor para o qual a água dá lugar ao ar em um processo de secagem. O ponto é definido pelo decréscimo acentuado da umidade volumétrica com o aumento da sucção

Para elaboração de projetos de taludes, o parâmetro sucção não é originalmente utilizado nos cálculos de estabilidade pois representa um incremento na estabilidade do talude, aumentando indiretamente o coeficiente de segurança do projeto, sendo considerado para os cálculos sempre a pior situação que é a de saturação. Entretanto, em função do crescente interesse na análise quantitativa para a previsão de escorregamentos em encostas naturais, a influência da sucção na resistência ao cisalhamento é de suma importância,

principalmente nas análises que consideram a infiltração da chuva como agente deflagrador de escorregamentos. Neste caso a perda da sucção pode ocorrer repentinamente ainda durante o evento chuvoso e causar a ruptura caso a estabilidade da encosta dependa dela.

3.4.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM SOLOS

A resistência ao cisalhamento em solos saturados é independente do critério de ruptura adotado, é expressa como função da tensão efetiva (σ'), definida por Terzaghi (1936), como:

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (1)$$

Onde:

σ – tensão normal total;

u_w – pressão de água nos vazios do solo

As primeiras teorias relativas ao estudo da resistência ao cisalhamento de solos não saturados envolveram da mesma forma o conceito de tensões efetivas. No final dos anos 50 e meados da década de 60 diversas teorias foram criadas para definir o cálculo das tensões efetivas em solos não saturados (e.g. Croney *et al.*, (1958); Aitchison, (1961); Jennings, (1961)). Entretanto, de todas as teorias propostas neste contexto, a mais conhecida é a de Bishop (1959), descrita na EQUAÇÃO 2:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \chi(u_a - u_w) \quad (2)$$

Onde:

u_a – pressão no ar dos vazios do solo;

χ – parâmetro dependente do tipo do solo e seu grau de saturação.

A EQUAÇÃO 2 apresentou um novo parâmetro (χ) que não constitui uma característica principal do solo, sendo função de sua história prévia de

umedecimento e secagem, além do grau de saturação (e.g. Bishop e Blight, (1963); Fredlund e Morgestern (1977))

Fredlund (1973) demonstrou que o estado de tensões de um solo não saturado pode ser integralmente definido pelas variáveis de tensão $(\sigma - u_a)$, $(\sigma - u_w)$ e $(u_a - u_w)$. Quaisquer duas dessas variáveis, considerando-se, que $(\sigma - u_a) + (\sigma - u_w) = (u_a - u_w)$.

Para demonstrar o estado de tensões no solo e, isto posto, ter condições de analisar seu comportamento mecânico sob variações de tensões, pode usar qualquer par das variáveis de tensões analisadas. O par $(\sigma - u_a)$ e $(u_a - u_w)$ é o mais simples de ser usado, pelo fato de que uma variação na pressão de água nos poros (u_w) , afeta somente a variável $(u_a - u_w)$, que é a sucção mátrica.

Baseados no conceito de variáveis de tensões, Fredlund *et al.* (1978) propuseram a seguinte equação de resistência ao cisalhamento para solos não saturados:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \theta' + (u_a - u_w) \tan \theta^b \quad (3)$$

Onde:

c' , θ' - parâmetros efetivos de resistência do solo saturado;

$(\sigma_n - u_a)$ - tensão normal líquida atuante no plano de ruptura, na ruptura;

$(u_a - u_w)$ - sucção mátrica na ruptura

θ^b - parâmetro que quantifica um aumento na resistência devido a um aumento na sucção

Considerando-se o critério de ruptura proposto por Mohr-Coulomb e a proposta de Bishop (1959), a equação de resistência ao cisalhamento de solos não saturados em termos de tensões efetivas é demonstrada em Bishop *et al.* (1960) e está demonstrada na EQUAÇÃO 4:

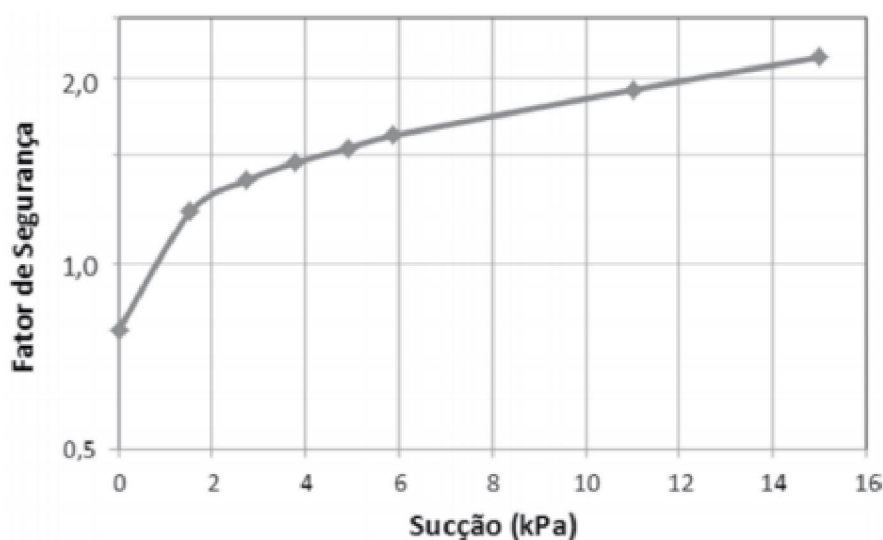
$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \theta' + \chi(u_a - u_w) \tan \theta^b \quad (4)$$

Comparando as duas equações (EQUAÇÃO 3 e EQUAÇÃO 4) é possível verificar que apesar de serem essencialmente diferentes em suas conceituações teóricas, resultam em equações equivalentes em termos de resistência do solo.

O parâmetro c , é estabelecido como sendo a coesão aparente definida por Taylor (1948) e o parâmetro c' quando o solo está na condição saturada.

Conforme Ignacius *et al.* (1991), mesmo na presença de baixos valores de coesão efetiva, é possível ter-se valores de coesão aparente grandes o suficiente para manter estável uma encosta não saturada sob efeito da infiltração pluvial. A FIGURA 9 ilustra que quando o fator de segurança está próximo a unidade, pequenas variações da sucção são capazes de aumentar em 20% no valor do fator de segurança.

FIGURA 9 – VARIAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA DE UMA ENCOSTA NÃO SATURADA COM A SUCÇÃO



FONTE: ADAPTADO DE IGNACIUS *et al.* (1991)

Os resultados ilustrados na FIGURA 9 demonstram a relevância do valor adotado para c em estudos de estabilidade envolvendo solos não saturados.

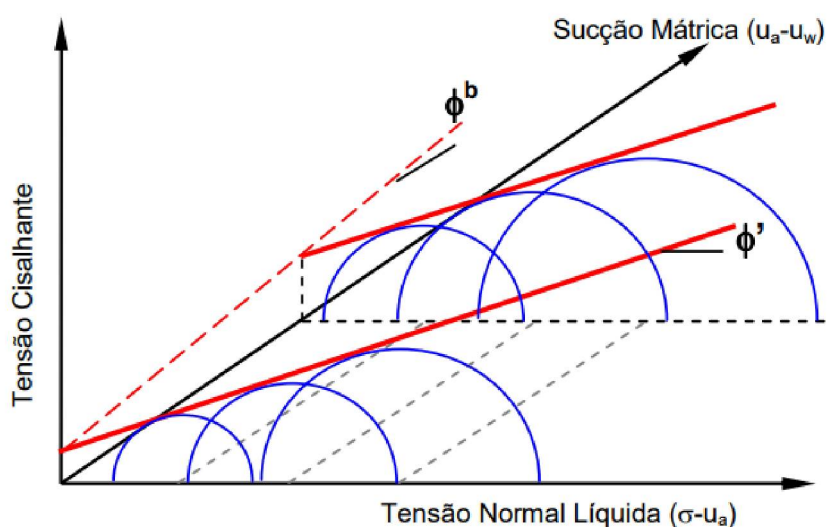
Estudos realizados por Escário e Sãez (1986, 1987) e Rohm e Vilar (1995) demonstram que o ângulo de atrito (θ') aumenta com o nível de sucção aplicada em ensaios nos quais manteve-se sucção constante e variou-se a tensão normal.

Diferente da envoltória de resistência dos solos saturados que é bidimensional, envolvendo as variáveis de tensão normal e cisalhante. Para o

caso de solos não saturados é necessário partir para o espaço tridimensional para definir a envoltória de ruptura. Fredlund e Rahardjo (1993) apresentam com detalhe como se obtém a envoltória de ruptura para a condição não saturada, chamada de envoltória de ruptura estendida de Mohr-Coulomb.

A FIGURA 10 ilustra o gráfico tridimensional. Representando o eixo das ordenadas está a tensão cisalhante e no eixo das abcissas as variáveis do estado de tensão. A envoltória de resistência consiste em um plano com inclinações ϕ^b no eixo $\tau x (u_a - u_w)$ e ϕ' no eixo $\tau x (\sigma - u_a)$, qualquer linha nesse plano, traçada paralela aos eixos $\tau x (\sigma - u_a)$, intercepta o plano definido pela origem dos eixos $\tau x (u_a - u_w)$ em uma ordenada $c = c'(u_a - u_w) \tan \theta^b$.

FIGURA 10 – ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA DE SOLOS NÃO SATURADOS



FONTE: ADAPTADO DE FREDLUND *et al.* (1978)

3.5 A ÁGUA NO SOLO

Para que haja movimento, fluxo, de qualquer fluido em um meio qualquer é necessário que haja diferenças de energia interna ou intrínseca entre as moléculas do fluido localizadas em diferentes regiões do meio. Nesse caso, o meio poroso (solo). Em havendo diferenças de energia ou potencial, o fluido sempre migrará das regiões em que as suas moléculas se encontrem com maior energia interna para aquelas onde se encontram em condições de menor energia (Carvalho *et al.*, 2015)

A condutividade hidráulica saturada constitui uma das mais importantes propriedades que governa o movimento da água nos solos. A água em estado líquido nos solos, flui graças aos gradientes de potencial existentes, sendo o sentido do fluxo da zona com maior potencial para a de menor potencial.

Segundo Libardi (2001), a condutividade hidráulica é um coeficiente que expressa a facilidade com que um fluido é transportado através de um meio poroso e que depende, portanto, tanto das propriedades do meio como das propriedades do fluido. Como principais propriedades relacionadas ao solo tem-se a distribuição de tamanho e formato das partículas, a porosidade, a tortuosidade e a estrutura, e do fluido, o peso específico e a viscosidade, influenciada principalmente pela variação de temperatura.

Conforme exposto por Libardi (2001), a condutividade hidráulica não saturada é aquela que ocorre no solo em qualquer condição de teor de umidade menor que a de saturação, ou seja, quando o espaço poroso é parcialmente preenchido por água e parcialmente preenchido por ar.

Nesta condição a movimentação do fluido é muito mais lenta quando comparada a condição saturada. Isso ocorre principalmente pelo fato de que o fluido se movimenta preferencialmente pela fase líquida do solo. Sendo assim, quanto maior a quantidade de água existente nos poros mais rápida será a movimentação da água no solo (MIYAZAKI, 1993).

O aumento da pressão neutra está diretamente associado a presença da água no interior do maciço. É de interesse da Engenharia Geotécnica estudar a estabilidade de encostas a partir de eventos antecedentes de chuva. As chuvas não representam o único fator que deve ser analisado para avaliar a estabilidade de uma encosta (*e.g.* diminuição do efeito da coesão aparente, rebaixamento rápido do lençol freático, oscilações térmicas, vibrações). Trata-se, entretanto, do aspecto mais significativo, distanciando dos demais fatores em importância. A ocorrência de um elevado índice de pluviosidade é condição necessária, mas nem sempre é suficiente para o desencadeamento de escorregamentos (GUIDICINI E NIEBLE, 1984).

3.5.1 INFILTRAÇÃO

A infiltração é considerada como a entrada de água no solo através da superfície. O processo de infiltração pode ocorrer por gravidade ou capilaridade, deslocando-se da superfície onde se supõe haver suprimento de água, para o interior, avançando como uma frente de umedecimento com o decorrer do tempo. O parâmetro comumente utilizado para quantificar a infiltração de água no solo é a velocidade ou taxa de infiltração, que é definida com a quantidade de água que atravessa a unidade de área da superfície do solo por unidade de tempo (AHRENDT, 2005).

A existência da poropressão negativa (sucção), contribui para aumentar a resistência do solo e conseqüentemente promover uma maior estabilidade para a encosta. Fredlund e Rahardjo(1993) e Rahardjo *et. al.* (1995) concluíram que após a infiltração da chuva, há uma redução da sucção causando uma perda de resistência ao cisalhamento a qual pode desencadear um processo de ruptura. É muito comum assumir a ruptura de taludes devido ao aumento da superfície freática, entretanto, quando esta se encontra a profundidades significativas as mudanças de poropressões estão associadas diretamente aos efeitos climáticos na superfície.

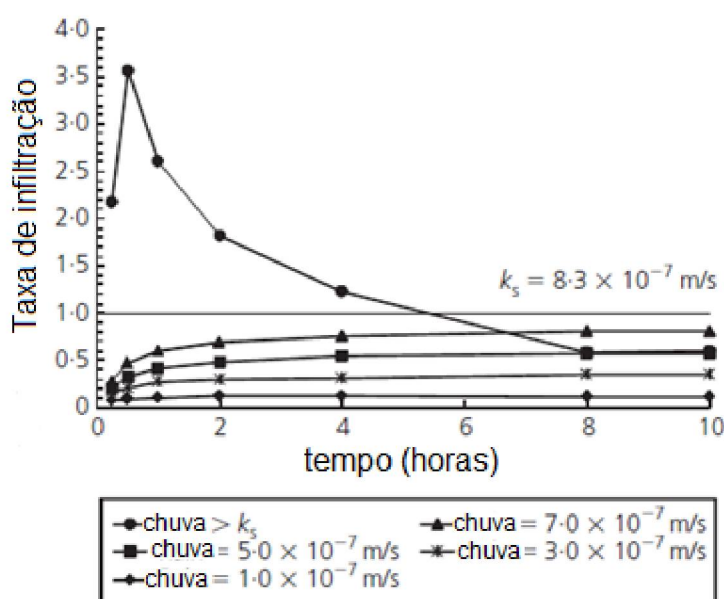
Ering e Babu (2016), retro analisaram um escorregamento ocorrido na Índia e concluíram que as chuvas antecedentes, a intensidade e duração dessas chuvas tem efeitos diretos na estabilidade de taludes. As reduções nos fatores de segurança foram devidas as chuvas antecedentes, nas quais, a infiltração das águas pluviais com alta intensidade e curta duração em conjunto com a redução da sucção, foram suficientes para causar a desestabilização do maciço.

Wu *et al.* (2017), analisaram a infiltração da água das chuvas a partir de chuvas artificiais para modelos reduzidos com diversas inclinações e concluíram que para chuvas de 45 mm/h, os modelos com inclinações menores (45 graus) apresentaram maior taxa de infiltração do que no modelo testado com 60 graus. Inferindo que taludes com menores inclinações é necessário chuvas mais longas e grandes acumulados para ocorrer a ruptura.

Li *et al.* (2005), em estudo da taxa de infiltração em um talude em Hong Kong demonstraram que o fenômeno chamado de *run off* ocorre apenas quando

o solo próximo da superfície se torna saturado. Rahardjo *et al.* (2005) aplicaram uma chuva artificial em com intensidade de 13×10^{-6} m/s em um solo inicialmente não saturado com coeficiente de permeabilidade saturado de $5,18 \times 10^{-6}$ m/s e encontraram que a capacidade de infiltração do solo convergiu para $2,0 \times 10^{-6}$ m/s (aproximadamente 0,4 o valor do coeficiente de permeabilidade saturado). Resultados de Gasmo *et al.* (2000) demonstraram que a taxa de infiltração inicial pode ser maior do que o coeficiente de permeabilidade saturado e pode gradualmente reduzir até um valor menor que o k_{sat} , essa relação pode ser visualizada na FIGURA 11.

FIGURA 11 – TAXA DE INFILTRAÇÃO EM UM TALUDE



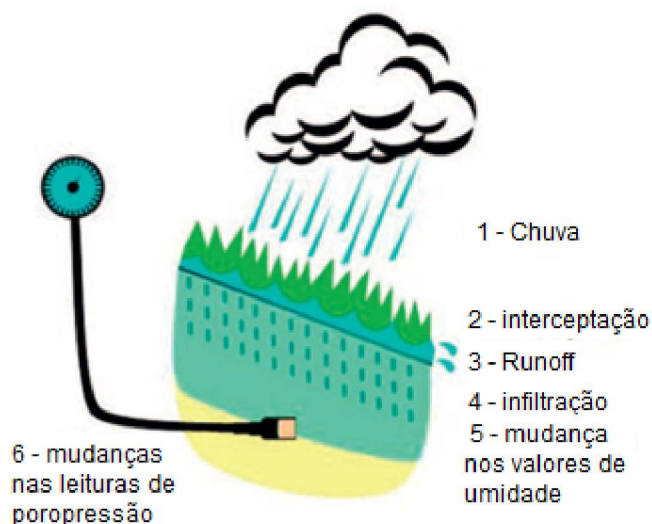
FONTE: ADAPTADO DE GASMO (2000)

O efeito das chuvas no acréscimo da umidade do solo devido a infiltração é altamente influenciado pelas condições iniciais do solo que são caracterizadas pelos eventos antecedentes de chuvas (COMEGNA *et al.*, 2016).

Conforme Toll *et al.* (2011), o acumulado de chuva é o parâmetro mais usual no que se refere a sistemas de alertas para movimentos de massa. No entanto, há uma série de fatores que compreendem o parâmetro comumente medido (chuva) e as alterações nas poropressões. Quando se inicia um evento pluviométrico, parte desta água será interceptada pela vegetação, outra parte irá

percolar pela superfície (*run off*), o restante irá infiltrar no solo e promoverá o aumento da umidade que conseqüentemente promoverá as alterações nas poropressões medidas. A sequência de eventos descritos acima está ilustrada na FIGURA 12.

FIGURA 12 – ESQUEMA ILUSTRATIVO DO PROCESSO QUE CAUSA ALTERAÇÕES NA POROPRESSÃO



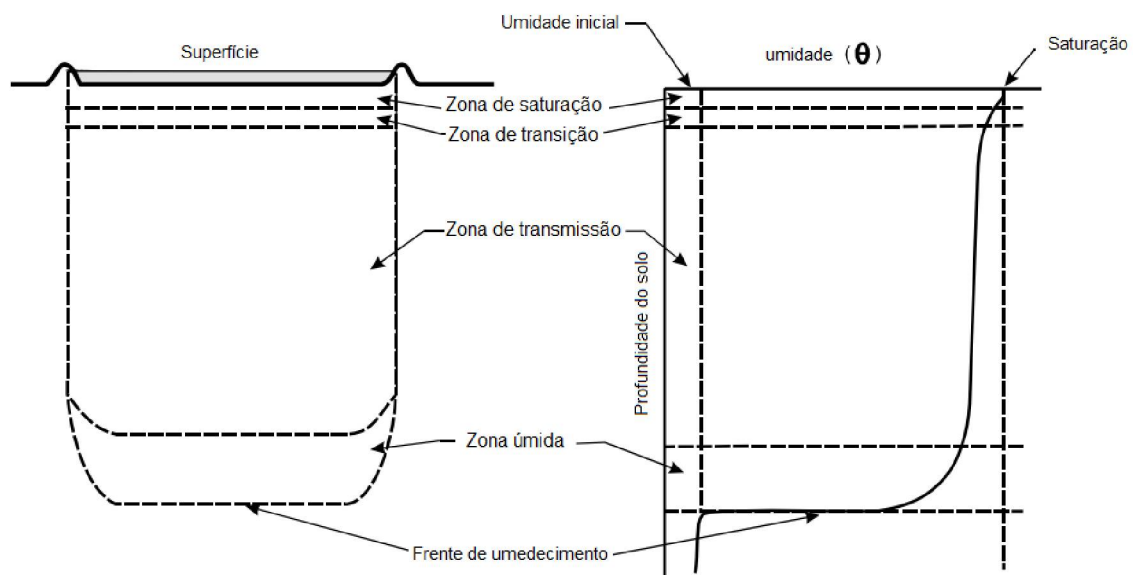
FONTE: ADAPTADO DE TOLL *et al.* (2011)

O processo de movimentação da água é dinâmico e sofre drásticas mudanças ao longo do tempo e do espaço. O Conhecimento do processo de infiltração é pré-requisito para compreender o fluxo de água dentro do solo. Em estudo apresentado por Hillel (1982) é demonstrado que o mecanismo de distribuição de água no solo o qual é composto por 5 fases (FIGURA 13):

- Zona saturada: os espaços porosos são preenchidos pela água. Em geral esta zona estende-se por poucos milímetros.
- Zona de transição: essa zona é caracterizada por um rápido decréscimo da umidade com a profundidade e pode estender por alguns centímetros
- Zona de transmissão: esta é caracterizada por uma pequena mudança na umidade com a profundidade, podendo ser considerada com uma zona não saturada mais longa e de umidade uniforme

- Zona úmida: nessa zona ocorre um grande decréscimo da umidade com a profundidade, aproximando-se da umidade inicial.
- Frente de umedecimento: essa zona é caracterizada por um intenso gradiente hidráulico e forma um limite abrupto entre a zona úmida e a seca. Abaixo dessa frente não se observa movimento descendente de água.

FIGURA 13 – MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA NO SOLO EM RELAÇÃO A PROFUNDIDADE



FONTE: ADAPTADO DE HILLEL (1982)

No caso de condições transientes de entrada de água, gerada a partir da ocorrência de precipitação, a formação da camada superficial de saturação somente será alcançada se a intensidade do evento chuvoso for maior do que a capacidade de infiltração do solo superficial ou a duração do evento for suficientemente longa para que ocorra o acúmulo de água no solo.

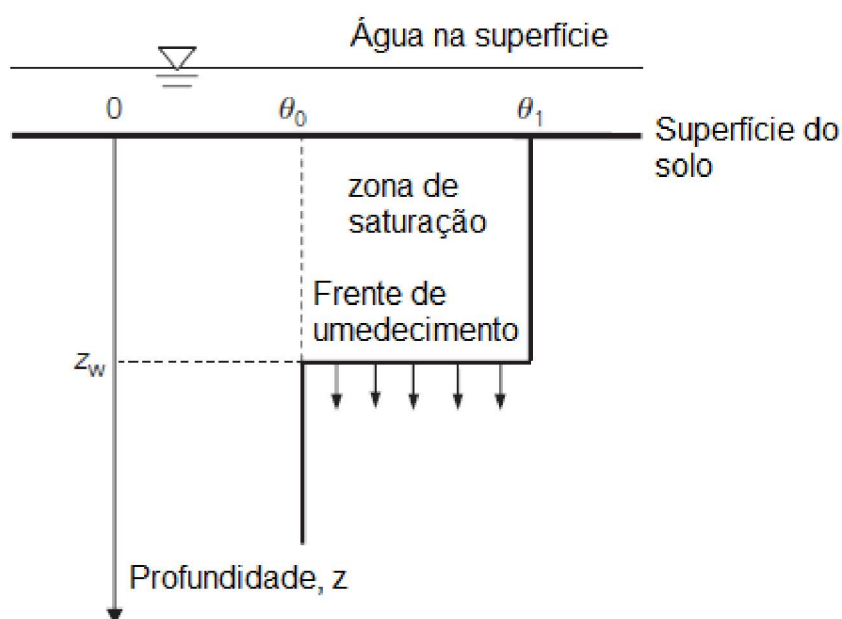
3.5.2 MODELOS CONCEITUAIS DE INFILTRAÇÃO

A combinação da lei de Darcy aplicada ao fluxo em meios não saturados e a equação da continuidade são considerados os métodos mais completos para análises de infiltração e obtenção perfis de umidade de solos em sistemas

saturados e não saturados. Entretanto, devido à variabilidade natural do campo, incertezas nas condições iniciais e de contorno, a resolução numérica por equações diferenciais parciais é muito complexa para aplicações práticas. Em resposta a essas complexas soluções numéricas foram criados modelos baseados no conceito de frentes de umedecimento (e.g. Green e Ampt, (1911); Lumb, (1962); Mein e Larson, (1973); Sun *et al.*, (1998)).

O modelo de infiltração proposto por Green-Ampt (FIGURA 14) foi inicialmente proposto para descrever a infiltração através de meios parcialmente saturados baseados na lei de Darcy.

FIGURA 14 – ILUSTRAÇÃO DO MODELO DE INFILTRAÇÃO DE GREEN AMPT



FONTE: ADAPTADO DE GREEN-AMPT (1911)

Acima da frente de umedecimento assume-se que o solo é completamente saturado, enquanto que o solo abaixo mantém a umidade. Imputa-se que o coeficiente de permeabilidade na zona molhada não se altera com o tempo e que há uma sucção constante acima da frente de umedecimento. De acordo com o modelo de Green-Ampt o tempo necessário para saturar o solo a uma profundidade (z_w) é dada por:

$$T_w = \frac{\phi_1 - \phi_0}{k_w} \left[Z_w - C_s \ln \left(\frac{C_s + Z_w}{C_s} \right) \right] \quad (5)$$

Onde ϕ_0 é a umidade inicial antes do avanço da frente de umedecimento, ϕ_1 é a umidade após o umedecimento, k_w é o coeficiente de permeabilidade do solo na zona de umedecimento e C_s é a frente de umedecimento capilar da sucção. A taxa de infiltração no solo pela superfície (v_i) é:

$$v_i = k_w \frac{Z_w + C_s}{Z_w} \quad (6)$$

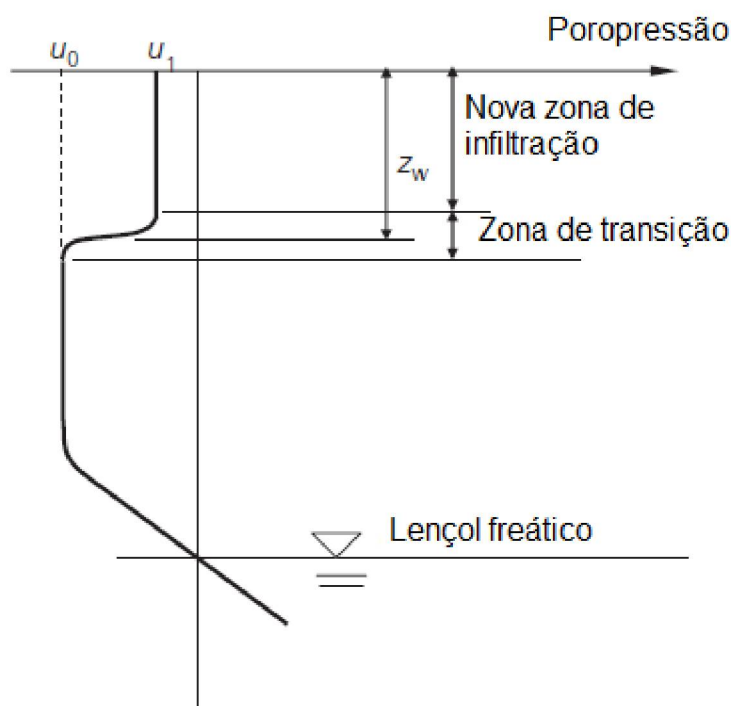
Considerando a condição na qual a intensidade da chuva é inicialmente menor que a capacidade de infiltração do solo, Mein e Larson (1973) modificaram o modelo de Green-Ampt (1911), e desenvolveram um simples modelo de dois estágios para prever a infiltração antes e depois da formação de uma lâmina de água na superfície do solo.

Lumb (1962) introduziu o conceito de frente de umedecimento relacionado as investigações de rupturas de taludes em Hong Kong. Sob efeito de longas e intensas chuvas, a profundidade (Z_w), da frente de umedecimento é definida como:

$$Z_w = \frac{k_{sat} t}{n(S_f - S_0)} \quad (7)$$

Onde k_{sat} é o coeficiente de permeabilidade saturado do solo, S_f é o grau final de saturação, S_0 é o grau de saturação inicial, n é a porosidade do solo e t é o tempo. A proposta da frente de umedecimento de Lumb (1962) assume que o fluxo na superfície do solo é igual ao coeficiente de permeabilidade saturada do mesmo. Quando a intensidade da chuva é de menor intensidade, o avanço da frente de umedecimento vai ser mais lento que a dada pela EQUAÇÃO 7. Sun *et al.* (1998) propuseram a generalização da equação apresentada por Lumb (1962). A FIGURA 15 apresenta a típica variação da sucção do solo com a profundidade em um meio não saturado.

FIGURA 15 – ESQUEMA DE INFILTRAÇÃO TRANSIENTE EM UM SOLO NÃO SATURADO



FONTE: ADAPTADO DE SUN *et al.* (1998).

Para um dado fluxo de superfície (q_0), menor que o coeficiente de permeabilidade saturada (k_{sat}) sob condições de estado estacionário, a poropressão é u_0 . Se o fluxo da superfície for acrescentado até q_1 uma nova zona de infiltração com poropressão u_1 será formada e gradualmente avançará com o tempo. A profundidade da frente de umedecimento pode ser calculada usando a EQUAÇÃO 8

$$Z_w = \frac{(k_1 - k_0)t}{\phi_1 - \phi_0} \quad (8)$$

Onde $k_0 = q_0$; $k_1 = q_1$; ϕ_0 é a umidade inicial antes do avanço da frente de umedecimento que corresponde a u_0 , ϕ_1 é a umidade volumétrica após o umedecimento que corresponde a u_1 .

Pradel e Raad (1993) propuseram uma equação baseada no modelo de Green e Ampt (1911). O modelo considera a intensidade, duração da chuva, teor de umidade volumétrica e a magnitude da sucção na frente de umedecimento.

De acordo com este modelo o tempo necessário para saturar o solo a uma certa profundidade é definido pela EQUAÇÃO 9:

$$T = \frac{\mu}{K_s} \left[Z_w - \Psi \ln \left(\frac{\Psi + Z_w}{\Psi} \right) \right] \quad (9)$$

Onde T é a duração da chuva, μ é a diferença entre o teor de umidade volumétrica saturado e inicial, K_s é o coeficiente de permeabilidade do solo, Z_w é a profundidade da frente de umedecimento e Ψ é a sucção na frente de umedecimento definida como a poropressão antes da chegada da frente de umedecimento.

A taxa de infiltração de chuva (v) no solo é definida na Equação 10:

$$v = k_s \left(\frac{\Psi + Z_w}{\Psi} \right) \quad (10)$$

De acordo com Pradel e Raad (1993) propuseram que a saturação do solo na profundidade da frente de umedecimento (Z_w) a intensidade de chuva (I) deve ser maior ou igual do que a taxa de infiltração no solo e a duração da chuva deve ser muito maior que I_{min} . Considerando $T = T_{min}$ e $I = I_{min}$ e $I_{min} = v$ e combinando as equações 9 e 10 obtemos a EQUAÇÃO 11:

$$I_{min} = \frac{\mu}{T_{min}} \left[Z_w - \Psi \ln \left(\frac{\Psi + Z_w}{\Psi} \right) \right] \left(\frac{\Psi + Z_w}{Z_w} \right) \quad (11)$$

Onde I_{min} é mínima intensidade de chuva e T_{min} é a mínima duração da chuva, ambas necessárias para produzir o avanço da frente de umedecimento até a profundidade " Z_w ". A EQUAÇÃO 11 assume o solo inicialmente não saturado, o talude é infinito e continuamente sofre o efeito de uma chuva e que não há perda de água devido à evaporação e *run off*. A EQUAÇÃO 11 pode ser utilizada para explorar as relações existentes entre a profundidade da frente de umedecimento, sucção na frente de umedecimento e a duração e intensidade de uma chuva.

3.5.3 SOLUÇÕES NUMÉRICAS E ANALÍTICAS

Grandes limitações são impostas aos modelos conceituais de infiltração, pelo fato deles não considerarem as inclinações referentes das encostas, o fluxo talude abaixo, variações na intensidade da chuva e a dependência da permeabilidade do solo no parâmetro de umidade volumétrica (NG E SHI, 1998).

Zhang *et al.* (2011) relataram que os modelos conceituais nem sempre distinguem a diferença entre a zona de infiltração e a zona na qual a poropressão negativa é mantida.

Baseada na lei de Darcy e a Lei de conservação de massa do fluxo de água, o fluxo tri dimensional de água em solos não saturados pode ser descrito como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial h}{\partial z} \right) = - \frac{\partial \phi_w}{\partial t} \quad (12)$$

Onde x, y e z são as três coordenadas cartesianas, ϕ_w é o teor de umidade volumétrica, k é o coeficiente de permeabilidade não saturada.

A solução da equação diferencial parcial de segunda ordem é complicado pelo fato da curva característica do sistema solo-água e a função de permeabilidade não saturada serem altamente não lineares. Soluções analíticas, se viáveis, são altamente vantajosas e simples em comparação com simulações numéricas (ZHAN E NG, 2001).

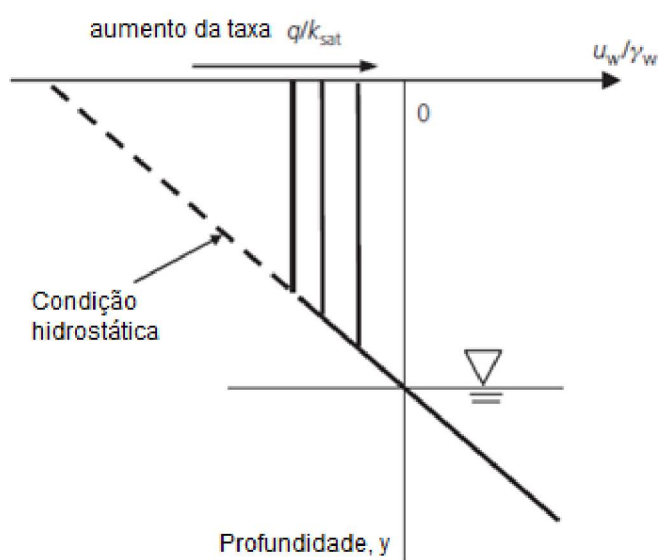
Iverson (2000) relatou que a água das chuvas pode infiltrar totalmente pelo solo se a intensidade da chuva for menor que permeabilidade saturada. Quando a intensidade da chuva é maior que a permeabilidade saturada a taxa de infiltração é igual a permeabilidade saturada e o excedente da chuva escoar sobre a superfície. Essa hipótese foi obtida em modelos de infiltração como os de Green-Ampt (1911) e Mein-Larson (1973). Estudos posteriores de Xue e Gavin (2008) expuseram que as hipóteses levantadas por Iverson (2000) não eram razoáveis, devido a estudos baseados em leituras de campo (Li *et al.*, 2005; Rahardjo *et al.*, 2005) e resultados de modelagens numéricas (Gasmol *et al.*, 2000). A utilização de *Softwares* para auxiliar a resolução dos modelos numéricos para casos de percolação e infiltração em solos não

saturados (e.g. Seep/w, 2007; SV flux, 2001) foi realizado em diversos trabalhos como meio de auxiliar nas análises de fluxo e percolação: (e.g. Tami *et al.*, 2004; Chen e Zhang, 2006; Ng *et al.*, 2001).

3.5.4 VARIAÇÃO DOS PERFIS DE POROPRESSÃO DEVIDO ÀS CHUVAS

O conceito de frente de umedecimento provém de uma metodologia simplificada para considerar mudanças na saturação do solo sujeitas as condições atmosféricas, no caso, as chuvas. Abaixo serão discutidas as típicas distribuições de poropressões devido ao fluxo de água. A FIGURA 16 ilustra a distribuição da poropressão para as condições de regime permanente.

FIGURA 16 – TÍPICO PERFIL DE POROPRESSÃO EM SOLOS SUJEITOS A CONDIÇÃO DE REGIME PERMANENTE



FONTE: ADAPTADO DE ZHANG (2011)

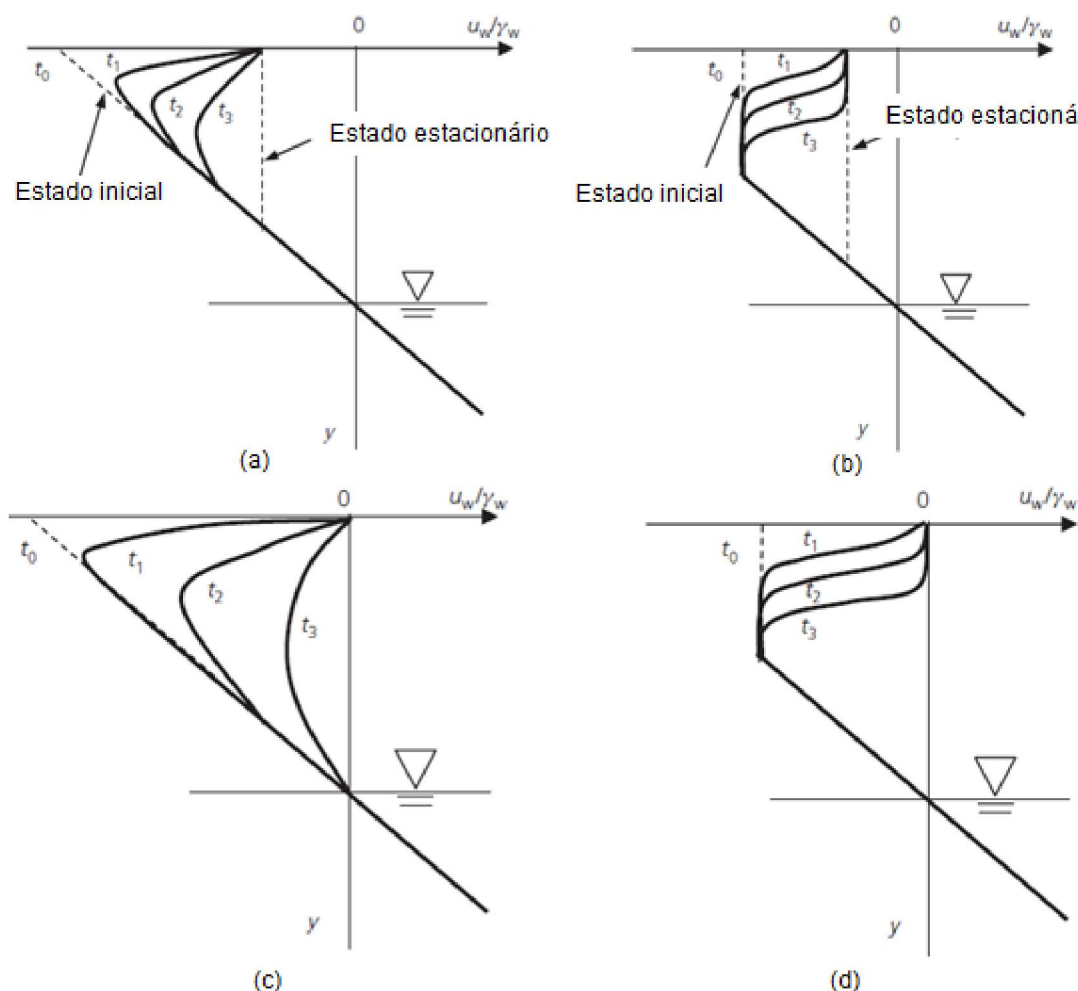
De acordo com Kisch (1959), o gradiente da poropressão sob condições permanentes pode ser escrito como:

$$\frac{du_w}{dy} = \gamma_w \left[\left(\frac{q}{k} \right) - 1 \right] \quad (13)$$

Onde γ_w é o peso específico da água.

A FIGURA 17 ilustra os perfis de poropressão sob efeito de fluxo transiente para os casos onde $q/k_{sat} < 1$ (FIGURA 17(a) e (b)) e $q/k_{sat} \geq 1$ (FIGURA 17 (c) e (d)).

FIGURA 17 – TÍPICOS PERFIS DE POROPRESSÃO EM SOLOS NÃO SATURADOS PARA A CONDIÇÃO DE FLUXO TRANSIENTE



FONTE: ADAPTADO DE ZHANG *et al.* (2011)

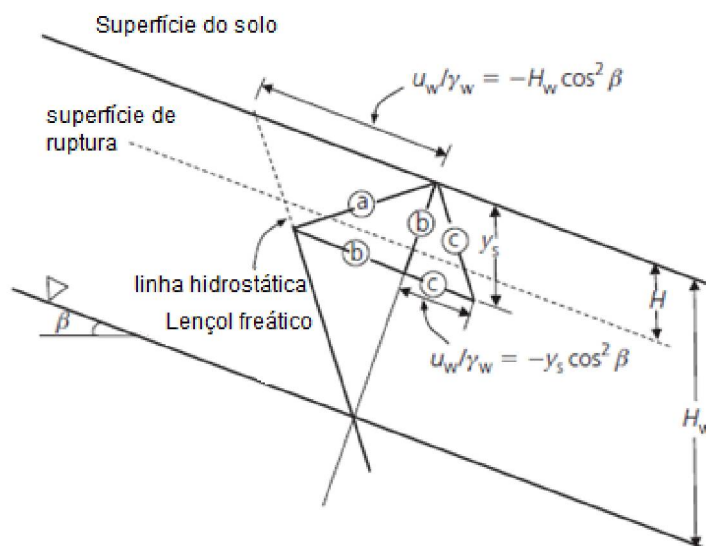
Conforme explanado em Zhang *et al.* (2011), a Infiltração sob fluxo em regime transiente pode ser considerada como um estado de transição entre a condição inicial e final no caso de fluxo sob condições permanentes. O estado inicial representado na FIGURA 17(a e b), estão sob condições hidrostáticas ($q = 0$). O estado inicial na FIGURA 17 (c e d) estão sujeitos a condições permanentes de fluxo onde o fluxo subterrâneo é maior que zero. O tempo para

alcançar-se a condição permanente em um solo é função dos seguintes parâmetros: fluxo subterrâneo, coeficiente de permeabilidade e capacidade de retenção de água do solo.

Quando o fluxo no interior do maciço é menor do que o coeficiente de permeabilidade saturado (FIGURA 17a e b) a sucção mátrica em um solo saturado pode decair, porém, não desaparecerá. Apenas quando o fluxo subterrâneo for igual ou maior ao coeficiente de permeabilidade saturado (FIGURA 17 c e d) a sucção mátrica pode ser eliminada se a duração da chuva for longa o suficiente.

Rahardjo *et al.* (1995) sugeriu três modelos idealizados de perfis de poropressão para condições não hidrostáticas. O perfil “a” (FIGURA 18) representa a situação na qual a sucção mátrica é reduzida a zero próxima a superfície. O perfil “b” (FIGURA 18) representa a condição de um rápido desenvolvimento da frente de umedecimento até a profundidade y_s . O perfil “c” (FIGURA 18) corresponde a condição em que o lençol freático está na profundidade y_s .

FIGURA 18 – POSSÍVEIS PERFIS DE POROPRESSÃO EM UM SOLO RESIDUAL



FONTE: MODIFICADO DE RAHARDJO *et al.* (1995)

Inúmeras investigações de campo (*e.g.* Blatz *et al.*, 2004; Cui *et al.*, 2005, 2010; Gasmo *et al.*, 1999; Kim e Lee, 2010; Li *et al.*, 2010, 2011; Ng *et al.*, 2003; Rahardjo *et al.*, 2005; Tsaparas *et al.*, 2003; Tu *et al.*, 2009;

Zhan *et. al.*, 2007) e testes em laboratório (Huang *et. al.*, 2008; Huat *et. al.*, 2006, Li *et. al.*, 2009b, Tohari *et. al.*, 2007) tem conduzido estudos que visam compreender as respostas do comportamento dos solos sob efeito de chuvas. Comparações entre a poropressão medida e a calculada (Trandafir *et. al.*, 2008) e as mudanças dos perfis de poropressão com o tempo (Huat *et. al.*, 2006 e Sako *et. al.*, 2006) tem sido estudada para compreender os perfis de poropressão gerados nos solos.

3.6 FATORES QUE INFLUENCIAM NOS ESCORREGAMENTOS INDUZIDOS PELA CHUVA

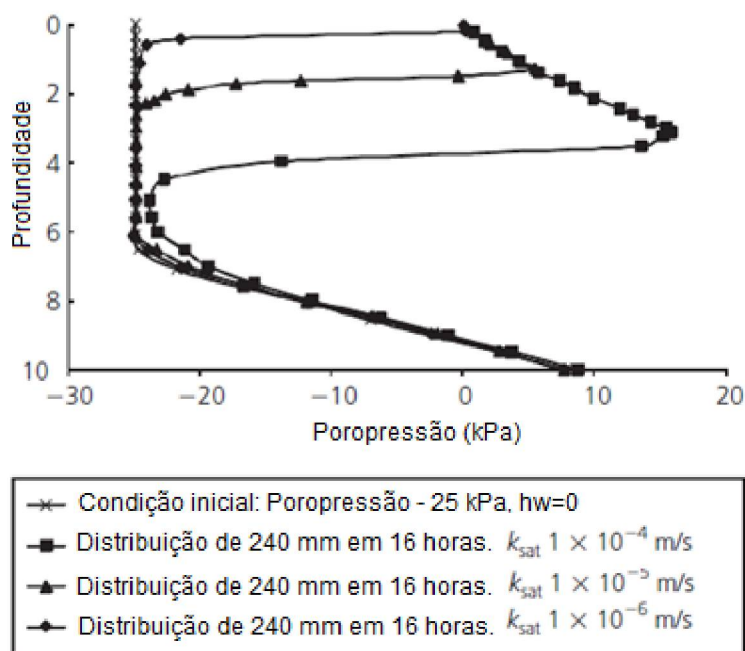
Análises da percolação e infiltração da água em solos não saturados e sua influência na estabilidade do maciço podem ser desenvolvida por softwares, como já citado acima. Entretanto, a interpretação dos resultados é dificultada pelo fato destas análises envolverem parâmetros relacionados as propriedades do solo, geometria do talude, profundidade do lençol freático e características das chuvas incidentes na região de estudo, que muitas vezes não são conhecidas.

3.6.1 PROPRIEDADES DO SOLO

Estudos de Ng e Shi (1998) e Rahardjo *et al.* (2007) demonstraram que a combinação mais crítica para estabilidade de taludes e mais suscetível aos efeitos das chuvas são as encostas que apresentam: ângulos de inclinação muito alto combinado grandes alturas da encosta e nível d'água superficial. A geometria do talude e a posição inicial do lençol freático irão determinar o fator de segurança inicial, e as características que irão levar à ruptura estão intimamente ligadas às características da chuva e do solo.

Tsaparas *et al.* (2002) expôs que, para uma mesma chuva, quanto maior for o coeficiente de permeabilidade saturado, maior será o incremento nos valores de poropressão para uma condição inicial e mais profunda que a frente de umedecimento irá alcançar (FIGURA 19).

FIGURA 19 – COMPARAÇÃO NOS PERFIS DE POROPRESSÃO GERADOS PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE



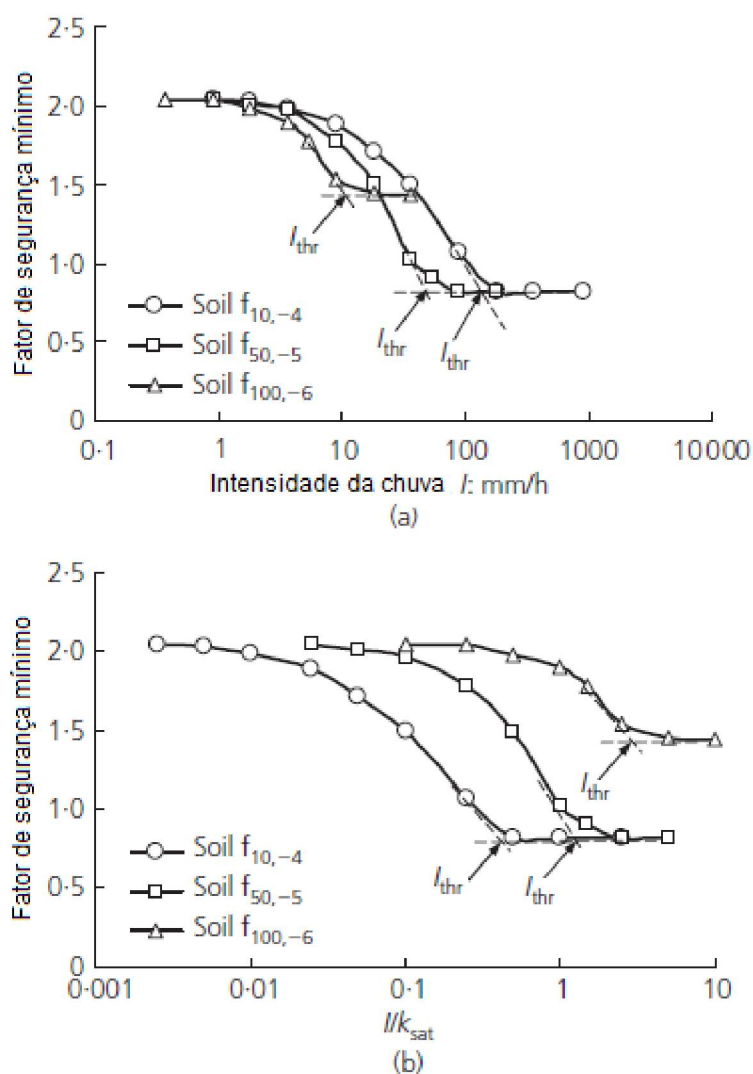
FONTE: ADAPTADO DE TSAPARAS *et al.* (2002)

Estudos apresentados por Zhang *et al.* (2004) e Collins e Znidarcic (2004) demonstraram que quanto maior é o coeficiente de permeabilidade saturada menor será o coeficiente de segurança da encosta. O estudo de Ng e Shi (1998), entretanto, demonstrou que para solos com baixo k_{sat} a redução da sucção mátrica e a elevação do lençol freático são os fatores mais relevantes a serem analisado. Resultados de Rahardjo *et al.* (2007) podem ser utilizados para explicar as divergências existentes entre a importância do k_{sat} na estabilidade de taludes.

A FIGURA 20 (a) ilustra a relação entre a intensidade da chuva e o menor fator de segurança atrelado a um talude homogêneo (10 metros de altura e ângulo de inclinação de 45°) sujeito aos efeitos da chuva por 24 horas. Para a mesma intensidade de chuva, o efeito do k_{sat} na redução do fator de segurança pode ser diferente. Quando a intensidade da chuva é menor que 10 mm/h, o menor FS (fator de segurança) foi obtido nos taludes com solo do tipo $f_{100,-6}$ ($k_{sat} = 10^{-6}$ m/s) e $f_{10,-4}$ ($k_{sat} = 10^{-4}$ m/s). Quando a intensidade da chuva é superior a 200 mm/h, o menor fator de segurança obtido foi para o solo $f_{50,-5}$ ($k_{sat} = 10^{-5}$ m/s). A FIGURA 20(b) ilustra o gráfico apresentando no

eixo x a relação entre intensidade da chuva (I) e o k_{sat} . É possível observar que para o mesmo I/k_{sat} , um alto valor de k_{sat} corresponde a um baixo fator de segurança.

FIGURA 20 – RELAÇÃO ENTRE A INTENSIDADE DE CHUVA E O FATOR DE SEGURANÇA EM UM TALUDE HOMOGÊNEO



FONTE: ADAPTADO DE RAHARDJO *et al.* (2011)

3.6.2 CARACTERÍSTICAS DA CHUVA

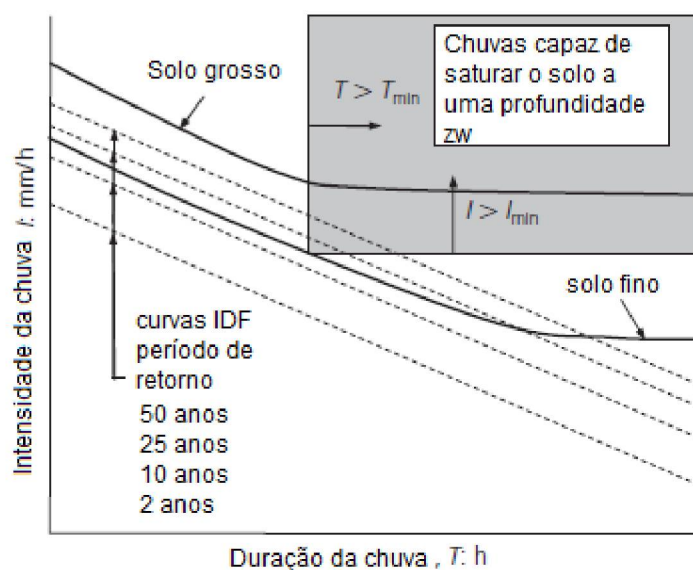
Investigações que correlacionam chuvas com escorregamentos de massa são tradicionalmente investigados tanto no Brasil como no mundo (*e.g.* Brand *et al.*, 1984; Dai e Lee, 2001; Finlay *et al.*, 1997; Lumb, 1975, Pun *et al.* 1999). Entretanto esses estudos são utilizados considerando que há uma relação direta

entre a precipitação e o escorregamento. Todavia, não consideram a influência inicial da geologia e de fluxo e infiltração das águas pluviais.

Os efeitos da chuva no que tange a intensidade, duração, padrões e os volumes acumulados antecedentes devem ser considerados em uma análise de estabilidade de taludes. É um conceito amplamente aceito na comunidade geotécnica o fato que quanto mais intenso for o evento pluviométrico maiores serão as reduções nas poropressões negativas gerando aumentos significativos no nível da linha freática (Ng e Shi, 1998 e Rahardjo *et al.*, 2011).

Obtendo as curvas de intensidade-duração-frequência (IDF) é possível determinar a chuva que pode saturar o solo a uma correspondente profundidade de umedecimento. A FIGURA 21 ilustra a curva para a intensidade e duração crítica de chuva para os solos grossos e para os solos finos realizada por Cho e Lee (2002). É possível observar que a curva para solos grossos é superior à de solos finos (FIGURA 21). Assim sendo, é necessária uma chuva significativa com um longo período de retorno para desencadear a ruptura em um solo com uma granulometria maior do que para um solo fino.

FIGURA 21 – CHUVA CAPAZ DE SATURAR UM SOLO ACIMA DA PROFUNDIDADE ZW BASEADO NO MODELO DE GREEN-AMPT



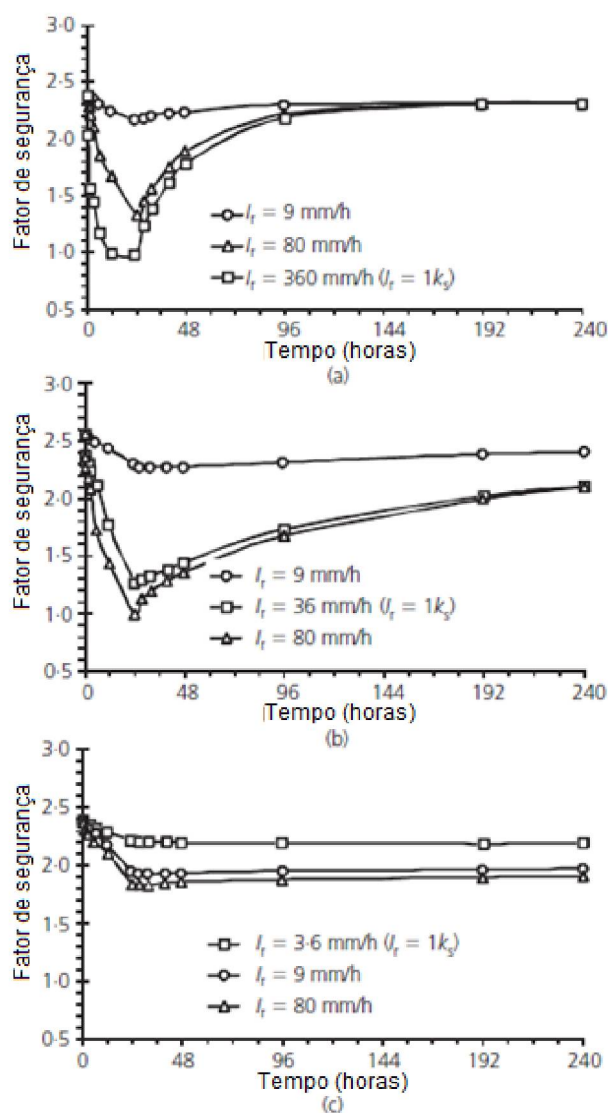
FONTE: ADAPTADO DE CHO E LEE (2002)

Em estudo na cidade de Seattle, Robinson *et al.* (2016) realizaram um comparativo a partir de duas curvas IDF: dados registrados (histórica) e

projetada (futuro). O impacto das curvas nas propriedades do solo (poropressões, grau de saturação, sucção) foi significativo. Robinson *et al.* (2016) conseguiram demonstrar que as mudanças dos padrões de chuva no futuro podem influenciar a estabilidade do talude com um todo.

Em estudo realizado por Rahardjo *et al.* (2007) inferiram que o efeito das chuvas antecedentes é mais significativa e afeta mais a estabilidade dos solos com baixo coeficiente de permeabilidade saturada ($k_{sat} \leq 10^{-6}$ m/s) do que os solos com maior k_{sat} ($k_{sat} \geq 10^{-5}$ m/s). O exposto acima pode ser visualizado na FIGURA 22

FIGURA 22 – EFEITO DAS PROPRIEDADES DO SOLO NAS VARIAÇÕES DO FATOR DE SEGURANÇA COM O TEMPO: (a) SOLO $f_{10,-4}$ (b) SOLO $f_{50,-5}$ (c) SOLO $f_{100,-6}$



FONTE: ADAPTADO DE RAHARDJO *et al.* (2007).

3.7 INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO

A cobertura vegetal pode produzir efeitos favoráveis ou desfavoráveis na estabilidade das encostas. De uma forma geral, a vegetação protege o solo de vários efeitos climáticos, e as raízes podem reforçar o solo, aumentando a resistência do sistema solo-raiz. Portanto, há consenso de que o desmatamento promove condições mais favoráveis para a instabilização das encostas. Superfícies desmatadas podem ficar vulneráveis a processos erosivos, além de receber maiores volumes de água precipitada sobre a superfície do talude (GERSCOVICH, 2012).

Em estudo realizado por Guidicini e Nieble (1984), foi descrito que copas e caules tem um papel independente das raízes. As copas protegem a superfície da ação dos agentes climáticos (raios solares, ventos, chuvas, etc.). Com isso, retardam a ação do intemperismo e reduzem o volume de água que incide sobre a superfície do talude. Já os caules geram um caminho preferencial de escoamento de água, concentrando a infiltração dos volumes de água precipitada no seu entorno. Os caules e copas também podem produzir aumento do peso sobre o talude ou provocar solicitações adicionais devido à ação do vento.

A interação entre o sistema solo-clima-vegetação é levada, segundo Rueda (2008), por diferentes relações de retroalimentação e dependência dos fundamentos presentes nos diversos subsistemas. A dinâmica deste sistema está representada pela quantidade de água no solo e o seu comportamento, pelo fato deste parâmetro resumir os fatores que se apresentam no solo, na vegetação e atmosfera.

O solo como participante deste sistema tem peculiaridades das quais depende da relação com outros fatores. A composição mineralógica, arranjo das partículas e textura determinam a quantidade de água que o solo pode armazenar. A vegetação controla os fluxos de energia e água, dividindo a precipitação em escoamento, evaporação, transpiração e quantidade de água armazenada no solo. O clima é um fator que irá disponibilizar água para vegetação e ditar os ritmos de difusão e evaporação (JOLY *et. at.*, 2016).

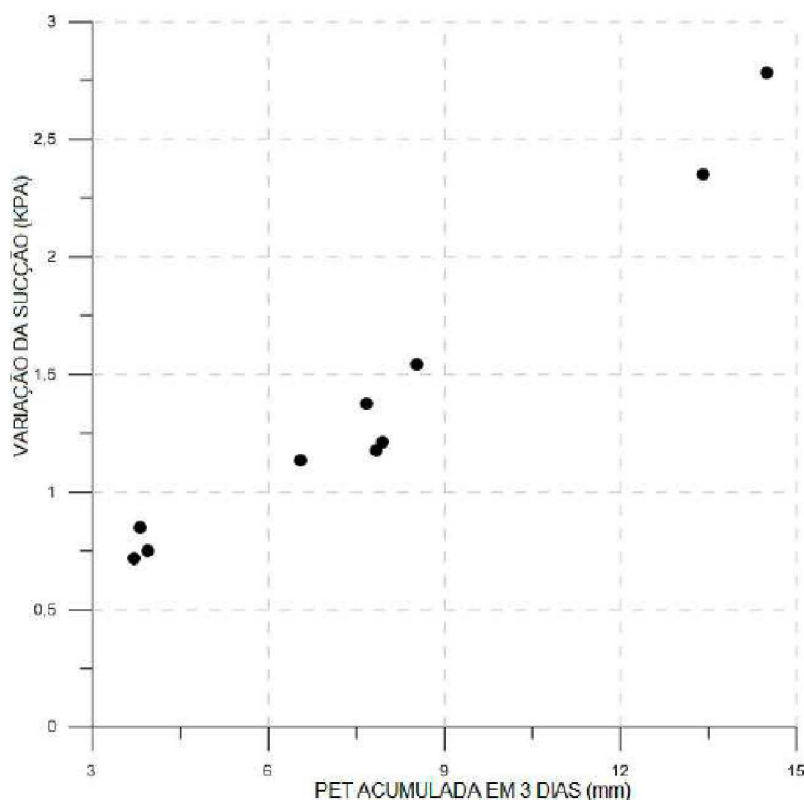
Conforme Rodrigues e Porporato (2004), a evapotranspiração é o fenômeno no qual a água no estado líquido é transformada em vapor por meio da troca de calor. O potencial de evapotranspiração (PET; mm/dia) é comumente estimado pela equação de Peman-Monteith (Allen *et. al.*, 1998). Esse método é tido, internacionalmente, como o mais pertinente para a estimativa da evapotranspiração. Além de procurar representar, de maneira consistente, o fenômeno biofísico da evapotranspiração, o método considera parâmetros meteorológicos que são medidos e registrados em estações meteorológicas de observação de superfície. Para tal, utiliza-se uma equação semiempírica onde considera-se o balanço de energia da vegetação devido a considerações da resistência de superfície e aerodinâmica. A EQUAÇÃO 15 apresenta a equação proposta por Allen *et. al.* (1998):

$$PET = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) \mu_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34\mu)} \quad (15)$$

Onde Δ é a declividade da curva de pressão de vapor, R_n é saldo de irradiação à superfície de cultura, G é o fluxo de calor no solo, T é a temperatura média diária do ar, γ é constante psicométrica, μ_2 é a velocidade do vento, e_s é a pressão de saturação do vapor média diária e e_a é a pressão atual de vapor média diária.

Em um estudo realizado na região de estudo desse trabalho, Joly *et. al.* (2016) observaram a partir da FIGURA 23 que, quanto maior o acumulado de evapotranspiração de 3 dias, maior é a recuperação da sucção após efeito de precipitação. As plantas através da evapotranspiração retiram a água do solo e a transformam em vapor. Quanto mais intenso este processo for, menor será a umidade do solo e consequentemente mais rápido se dará o acréscimo de sucção, reduzindo o risco de escorregamentos na região vadosa.

FIGURA 23 – CORRELAÇÃO ENTRE VARIAÇÃO DA SUCÇÃO E ACUMULADOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO



FONTE: JOLY *et al.* (2016)

3.8 INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA

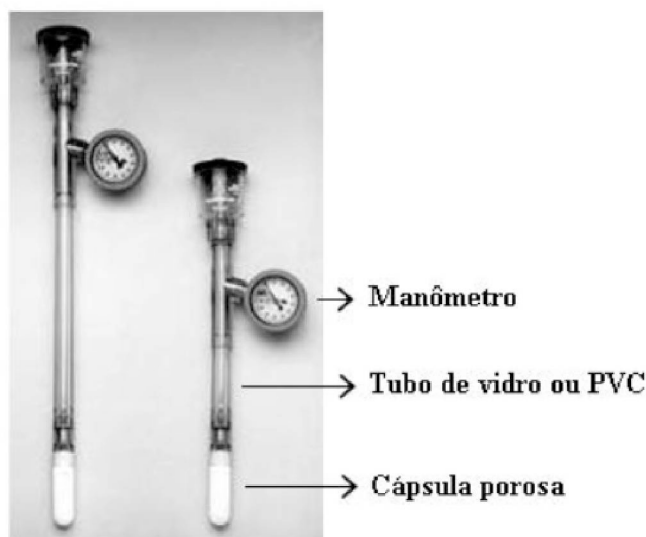
O principal objetivo da implantação de um sistema de monitoramento em uma encosta é a possibilidade de obter parâmetros geotécnicos que auxilie a compreender o comportamento desses maciços através do controle de poropressões, níveis d'água e controle de deslocamentos (SESTREM, 2012). Os equipamentos alvo desta revisão bibliográfica são: tensiômetros, piezômetros e pluviógrafos. Sendo estes, relatados nos parágrafos posteriores.

3.8.1 TENSIÔMETROS

O tensiômetro permite a medição direta da poropressão negativa da água do solo. A partir da qual tem-se o valor da sucção matricial. A componente osmótica da sucção não é medida pelos tensiômetros, já que ocorre passagem

dos sais solúveis através do sistema de medição. Conforme Oliveira (2010), o tensiômetro foi desenvolvido em 1922 por Gardner e colaboradores consistindo em uma cápsula porosa conectada a um manômetro através de um tubo de PVC ou vidro. O modelo tensiométrico, fornece de forma direta a tensão (sucção) ou o potencial de água no solo e de forma indireta a umidade. Um exemplo de um tensiômetro pode ser visualizado na FIGURA 24.

FIGURA 24 – TENSIOÔMETRO COMERCIAL



FONTE: OLIVEIRA (2010)

Os principais componentes de um tensiômetro são ilustrados na FIGURA 24. A ponteira porosa do tensiômetro é responsável por promover a interface entre a água do dispositivo e o solo sem permitir a entrada de bolhas de ar no sistema. Para desempenhar tal função, emprega-se, geralmente, um material cerâmico com alto valor de entrada de ar. O tensiômetro possui um compartimento interno que deve ser completamente preenchido por água e acoplado a um dispositivo para medição da pressão de água.

O dispositivo da pressão gerada no interior do instrumento pode ser de três tipos: manômetro de mercúrio, manômetro de vácuo e transdutor elétrico de pressão. A vantagem do manômetro de mercúrio é que não existe necessidade de calibração, porém, a correção da densidade deve ser feita evitando-se erros de até 0,25% na leitura (MARINHO *et al.*, 2008). Os manômetros de vácuo podem medir tensões de 0 a 100 kPa, sendo de fácil manutenção. Porém,

apresentando baixa acurácia. Os transdutores elétricos de pressão, diferentemente dos dois tipos de dispositivos citados anteriormente, permitem uma aquisição de dados automática. O princípio do seu funcionamento está no deslocamento de uma membrana e de resistores colados a ela, induzindo, assim, uma variação de resistência no sistema e, conseqüentemente, calibrados, além, de requererem pouco fluxo de água para entrarem em equilíbrio com o solo.

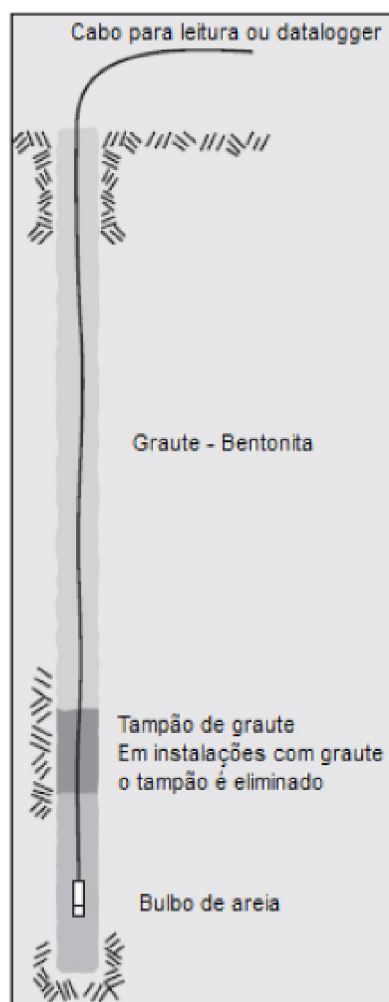
3.8.2 PIEZÔMETROS

O registro do uso de piezômetros advém do final do século 19 na Índia para o estudo da percolação na fundação de uma barragem utilizada para fins de irrigação. Sendo hoje um dos instrumentos mais importantes para o monitoramento da poropressão.

O piezômetro consiste basicamente em um conjunto formado por um elemento poroso denominado bulbo e um tubo piezométrico. Esse conjunto é introduzido em um furo de sondagem realizado na superfície, onde será efetuada a leitura até o local monitorado. A função deste instrumento é mensurar a pressão hidráulica, sendo o seu funcionamento fundamentado nos princípios dos vasos comunicantes, baseado no fato de que a pressão exercida pela coluna d'água no interior do tubo de leitura (FERC, 2008).

Os piezômetros de corda vibrante consistem em um diafragma metálico separando a pressão de água do sistema de medição. Um fio tensionado é ligado ao ponto médio do diafragma de forma tal que a deflexão do diafragma causa mudanças na tensão do fio. As leituras podem ser obtidas com um leitor portátil ou com *data loggers* (DUNNICLIFF, 1988).

FIGURA 25 – ESQUEMA DE UM PIEZÔMETRO DE CORDA VIBRANTE



FONTE: DGSi (2004)

De acordo com DGSi (2004), o princípio de corda vibrante estabelece que a tensão no fio seja proporcional ao quadrado de sua frequência natural. O piezômetro é projetado de modo que a pressão sobre o diafragma controla a tensão dentro do elemento de corda vibrante. O diagrama para instalação é apresentado na FIGURA 25

Conforme González (2013), quando a unidade de leitura está conectada ao cabo de sinal, esta envia um impulso elétrico a uma bobina que puxa o fio, fazendo-o vibrar na sua frequência natural. Uma segunda bobina capta a vibração e retorna uma leitura de frequência para a unidade de leitura. Depois de serem obtidas, estas leituras devem ser processadas de acordo com os fatores de calibração para obter unidades de pressão. Isto pode ser realizado automaticamente pela unidade leitora ou pelo processamento no computador.

Entre as vantagens na utilização deste tipo de instrumento, tem-se o fato que fornece respostas rápidas em todos os tipos de solos além de ser adequado para monitoramento autônomo ou automático com o uso de *data logger*. Entre as desvantagens que apresenta este instrumento tem-se que o instrumento calibrado fica enterrado e deve ter proteção contra descargas elétricas, além de ser suscetível a corrosão do elemento (fio) de corda vibrante e que requer instrumentos especializados para se fazer as leituras, aumentando o custo (GONZÁLEZ, 2013).

3.8.3 PLUVIÓGRAFOS

O pluviógrafo é um equipamento capaz de registrar automaticamente os dados de chuva em função do tempo de ocorrência, possibilitando medir a quantidade de chuva, tempo de duração e, portanto, sua intensidade (SESTREM, 2012).

Entre os diferentes modelos de pluviógrafos disponíveis, um dos quais se destaca pelo amplo uso é aquele que tem como princípio de medição as caçambas basculantes. O modelo de caçambas basculantes é formado por uma peça com duas caçambas, arranjadas de tal modo que, quando uma delas se enche, o peso da água a faz tombar e a coloca em posição para encher a outra. Cada tombamento equivale a 0,20 mm de água. Esta medida depende do fabricante, mas em geral, é a medida padrão. (GONZÁLEZ, 2013)

FIGURA 26 – PLUVIÓGRADO DE CAÇAMBAS BASCULANTES



FONTE: GONZÁLEZ (2013)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo são descritos o material e os métodos utilizados na pesquisa, fundamentado em bases de dados das leituras dos instrumentos instalados ao longo da encosta.

4.1 ÁREA DE ESTUDO

Nesta seção se apresentam as características geológico-geotécnicas do sítio de estudo, sistema de monitoramento implementado, série histórica dos equipamentos e os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos contidos na encosta

4.1.1 LOCALIZAÇÃO

A encosta objeto de estudo nessa dissertação foi demonstrada no trabalho de Sestrem (2012), González (2013) e Pretto (2014) e está localizada a sudeste do município de Balneário Camboriú na rodovia BR 101 no km 140 + 700 m, entre as coordenadas S 27°01'30" e S 27°02'30" e W 48°35'30" e W 48°36'30", correspondendo à feição geomorfológica do Morro do boi. A FIGURA 27 apresenta uma imagem de satélite da área.

FIGURA 27 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: GOOGLE EARTH (2017)

O talude monitorado está a 160 m acima do nível do mar e possui inclinações entre 1,0V:1,5H e 1,0V:2,0H. Os históricos de escorregamento na região são caracterizados devido aos altos eventos pluviométricos ocorridos em 2008, causando a interrupção parcial do tráfego nesta rodovia (Kormann *et al.*, 2011)

Além do plano de instrumentação proposto por Sestrem (2012), outros autores realizaram suas pesquisas no ambiente do Morro do Boi. Lazarim (2012), realizou a caracterização e ensaios para determinar a resistência ao cisalhamento da encosta. González (2013), realizou um estudo das séries de leitura dos instrumentos através de correlações estatísticas. Pretto (2014), realizou modelagens para obter o comportamento de tensão x deformação do maciço.

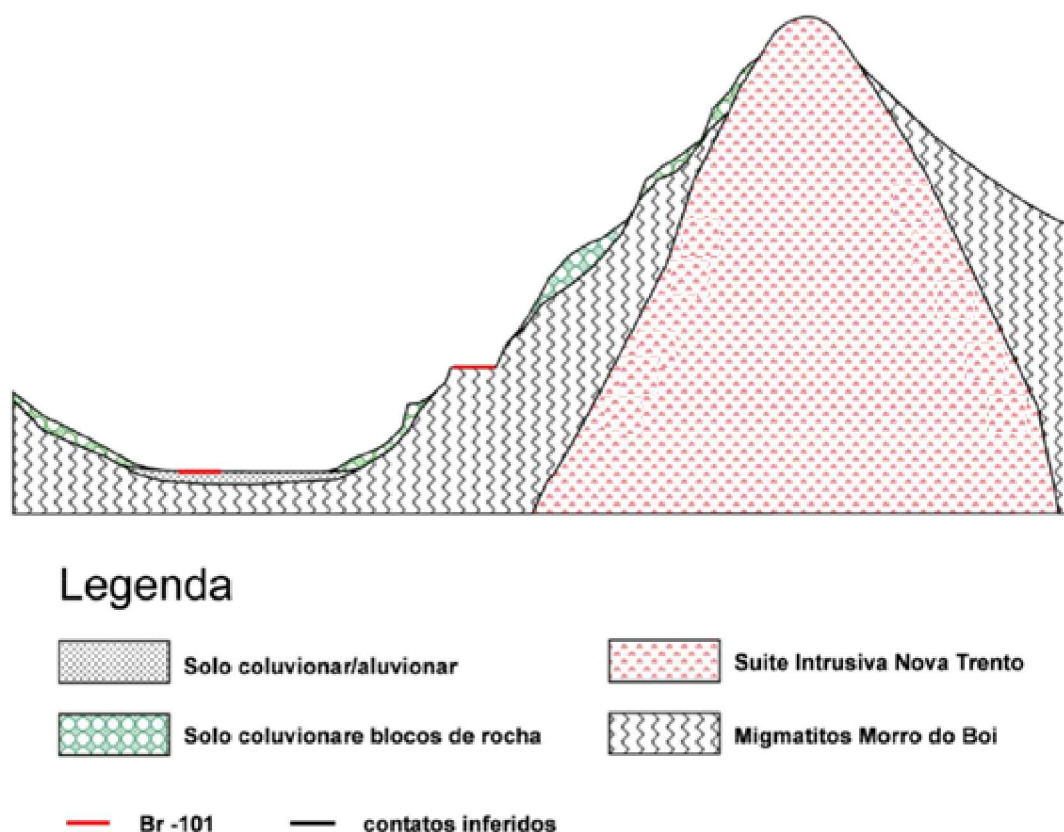
4.1.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS

As considerações sobre os aspectos geológicos foram descritos em relatórios e caracterizam-se principalmente pela presença de dois tipos litológicos principais: Migmatitos Morro do Boi e granitos da Suíte Intrusiva Nova Trento (FIORI, 2011; FIORI 2012).

Conforme González (2013), o sistema de fraturas que apresenta o corpo de Migmatito do Morro do Boi é gerado por zonas de cisalhamento de direção NE-SW e NW-SE e por fraturas sub-horizontais. Isto tem como efeito principal a subdivisão do maciço em blocos, o que diminui de maneira importante sua resistência mecânica devido a continuidade e interconexão destas fraturas fazendo com que o fluxo de água no interior do maciço seja facilitado. A zona de cisalhamento ou sistema de fraturas presentes na Suíte intrusiva Nova Trento é similar ao sistema do Migmatito.

A distribuição das unidades litológicas, massas de solo e blocos de rochas presentes é apresentado de maneira esquemática na FIGURA 28.

FIGURA 28 – SEÇÃO ESQUEMÁTICA DO MORRO DO BOI NO KM 140 + 700 M

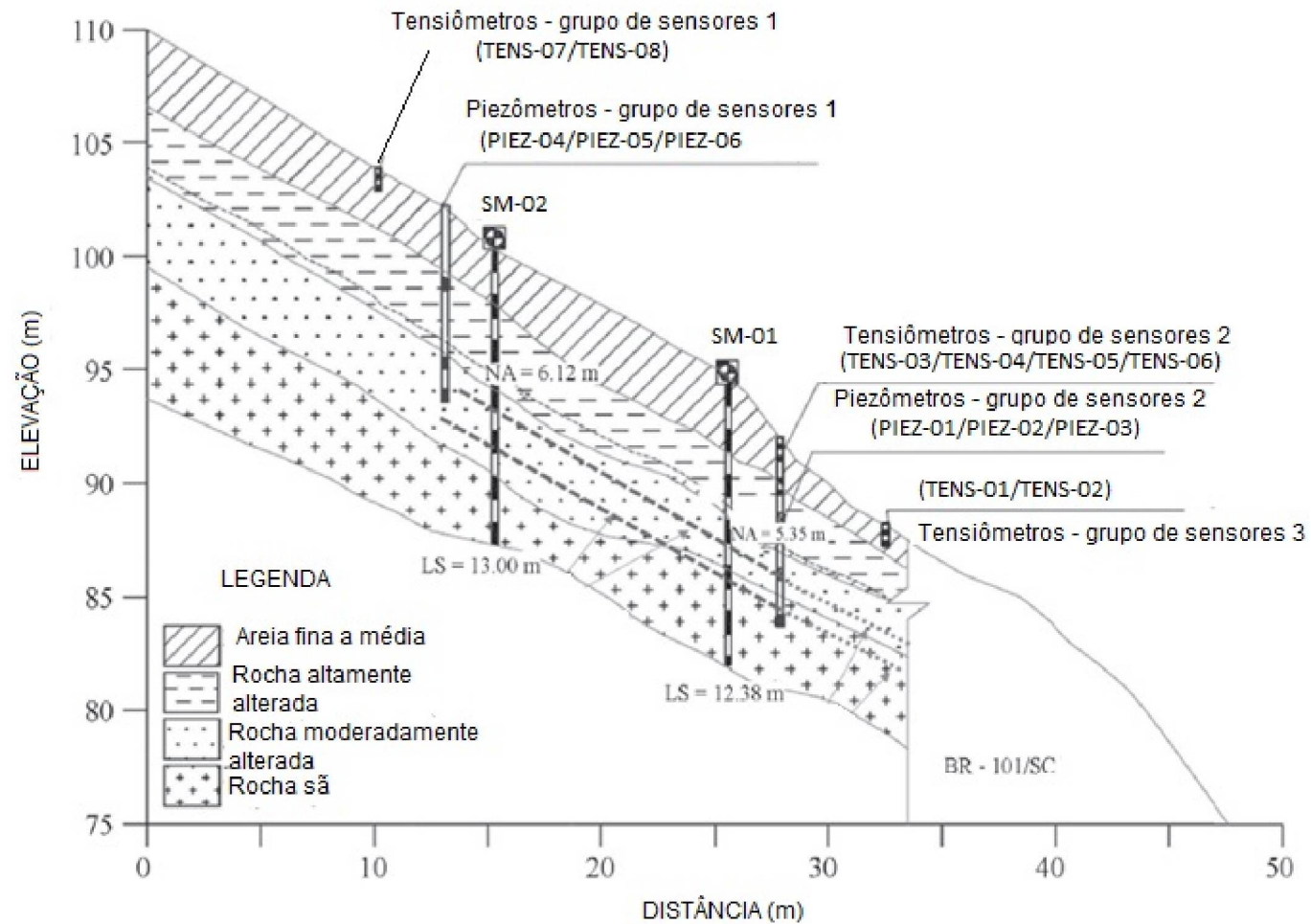


FONTE: FIORI (2011)

4.1.3 ASPECTOS GEOTÉCNICOS

Para uma maior compreensão das propriedades do solo encontrados no local foram realizadas duas sondagens mistas para caracterização do solo (SM - 01 e SM - 02) descritas por Sestrem *et al.* (2015). As camadas de solo observadas na FIGURA 20 são compostas por uma camada de rocha moderadamente alterada com espessura entre 3 e 4 m e uma camada de rocha altamente alterada, considerada como solo residual, com espessura entre 2 e 3 m de espessura. acima dessa camada é possível observar um solo coluvionar com espessura superior a 3 m definido como uma fina a média. O topo rochoso de migmatito é observado nas sondagens em profundidades a partir de 8 a 10m de profundidade.

FIGURA 29 – PERFIL GEOLÓGICO GEOTÉCNICO DA ENCOSTA ESTUDADA

FONTE: SESTREM *et. al.* (2015)

A FIGURA 29 também ilustra a variação dos níveis de água encontrados e a posição dos instrumentos em relação a encosta, estes serão descritos com mais aprofundamento nas seções seguinte.

4.1.4 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Para cada uma das camadas presentes na FIGURA 29, foram definidos os parâmetros de resistência ao cisalhamento conforme Lazarim (2012). A QUADRO 2 apresenta um resumo dos parâmetros geotécnicos. Na retroanálise realizada constatou-se que a cunha de ruptura passava apenas pela camada de areia fina a média. deve-se observar que os parâmetros das outras camadas (Rocha alterada e sã) não influenciaram nos valores do fator de segurança. Devido a este fato, esses parâmetros foram retirados considerando-se literatura especializada para materiais de mesma gênese.

QUADRO 2– PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Material	Peso específico (kN/m ³)	Ângulo de atrito (°)	Coesão (kPa)
Areia	16,5	32,6	5,7
Rocha alterada	16,5	38	14
Rocha sã	27	38	14

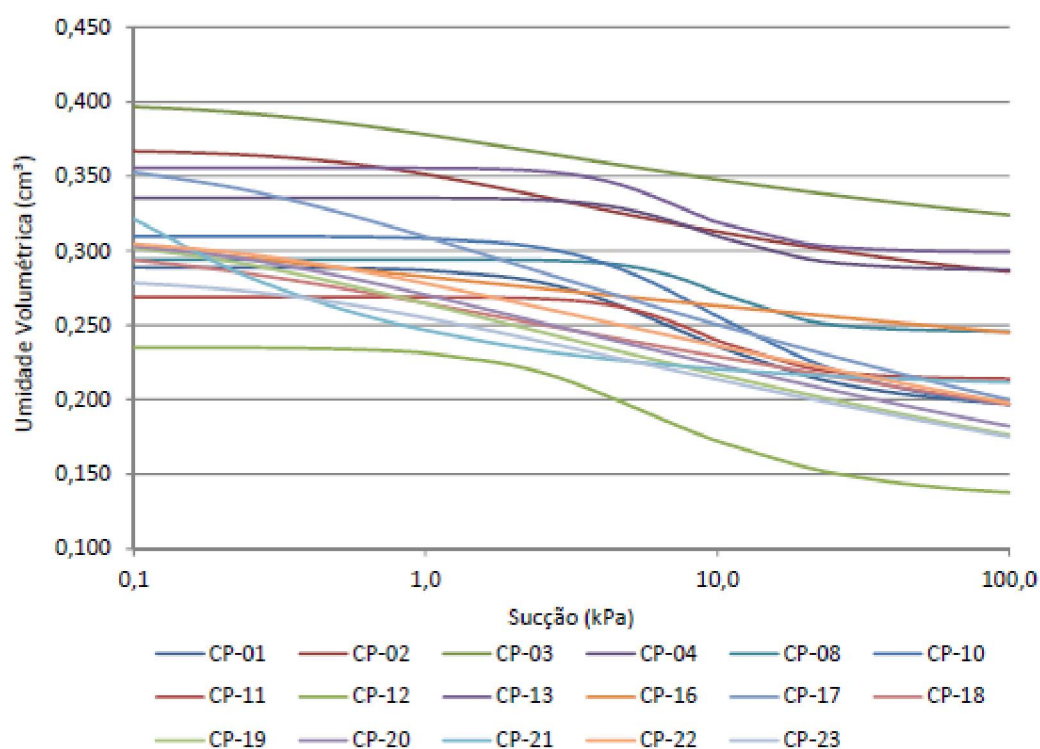
FONTE: ADAPTADO DE LAZARIM (2012)

4.1.5 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA E COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE

Pretto (2014) realizou os ensaios para a curva de retenção de água. O limite superior de sucção aplicada foi igual a 100 kPa, e os valores intermediários medidos foram definidos a partir de análises das leituras encontradas nos tensiômetros instalados. Estudos mais aprofundados sobre o assunto podem ser encontrados no trabalho de González (2013), onde o autor verifica que com o desenvolvimento da vegetação ocorre uma significativa variação na sucção ao longo do período de monitoramento. Porém em nenhum momento foram encontrados valores acima do limite proposto para os ensaios. Além disso,

comparando-se os valores obtidos com referências de sucção, pode-se afirmar que para materiais arenosos, as pressões de sucção entre 0 e 100 kPa são condizentes. Na FIGURA 30 são apresentadas as curvas de umedecimento, parâmetro importante para análises de estabilidade com fluxo transiente. As amostras partem de seu estado natural, não saturado, chegando a seu estado natural de saturação, ponto onde começam a ser desenvolvidas as frentes de saturação.

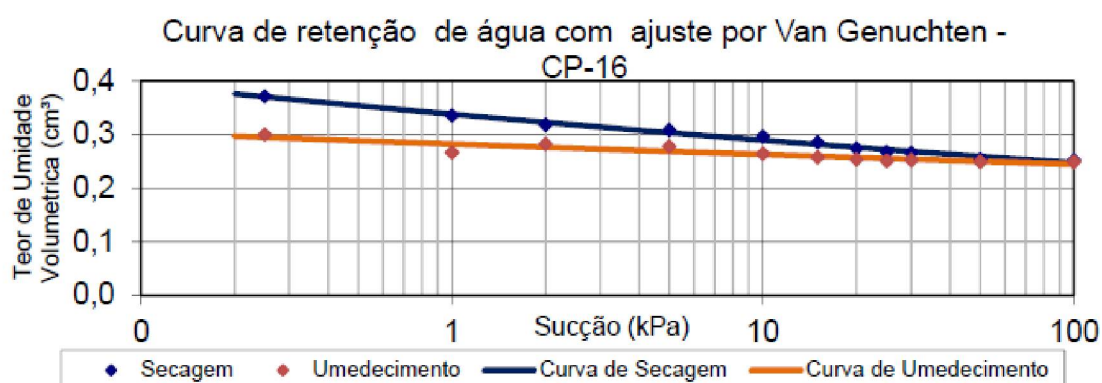
FIGURA 30 – CURVA DE UMEDECIMENTO DAS AMOSTRAS



FONTE: PRETTO (2014)

A curva de umidade do corpo de prova 16 apresenta um comportamento médio entre as curvas apresentadas por Pretto (2014). Desta forma, esta curva foi utilizada para obter os parâmetros de umidade e sucção nas análises realizadas nos próximos capítulos.

FIGURA 31 – CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA



FONTE: PRETTO (2014)

A QUADRO 3 apresenta os intervalos de confiança (95%) dos ensaios de permeabilidade *in situ* esses realizados por Pretto (2014).

QUADRO 3– INTERVALO DOS COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE

Limite inferior	4,47 E-5 cm/s
Limite superior	1,71 E-4 cm/s

FONTE: ADAPTADO DE PRETTO (2014)

4.1.6 INSTRUMENTOS INSTALADOS

A presente pesquisa realizou as análises a partir das respostas dos tensiômetros, piezômetros e pluviógrafo. Conforme descrito por Sestrem (2012), os piezômetros instalados no local correspondem a instrumentos de corda vibrante e tem como função registrar as medidas de poropressão. Dentre os sensores disponíveis optou-se pelo modelo 4500S da Geokon. A FIGURA 32 ilustra o piezômetro contido no campo de estudo.

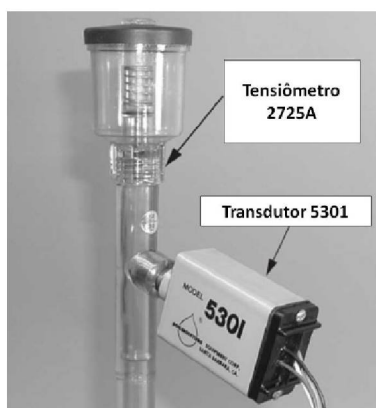
FIGURA 32 - PIEZÔMETRO DE CORDA VIBRANTE 4500S



FONTE: GEOKON (2012)

Os tensiômetros utilizados na instrumentação correspondem a instrumentos de resistência elétrica e a propriedade que medem é a sucção. Dentre os equipamentos disponíveis, foi utilizado o modelo 2725A da Soilmoisture. Este equipamento pode ser visualizado na FIGURA 33.

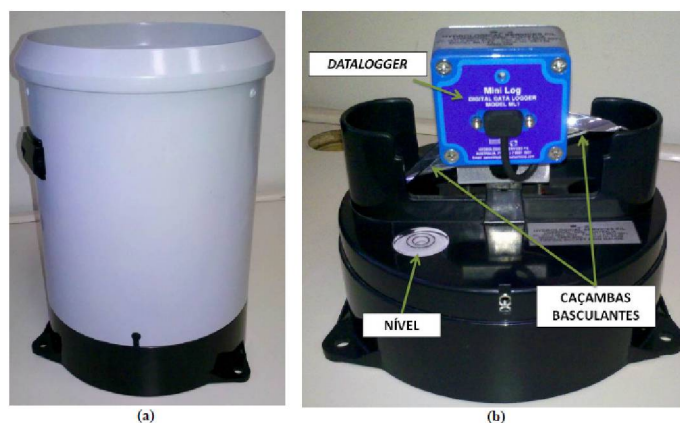
FIGURA 33 – TENSIOÔMETRO 2725A E TRANSDUTOR 5301



FONTE: SOILMOISTURE (2011)

O pluviógrafo contido na região de estudo corresponde ao tipo de caçamba basculante e a sua função é registrar as precipitações pluviométricas. Escolheu-se o modelo TB4/0,2 da Hydrological Services, este equipamento pode ser visualizado na FIGURA 34

FIGURA 34 – PLUVIÓGRAFO TB4/0,2MM

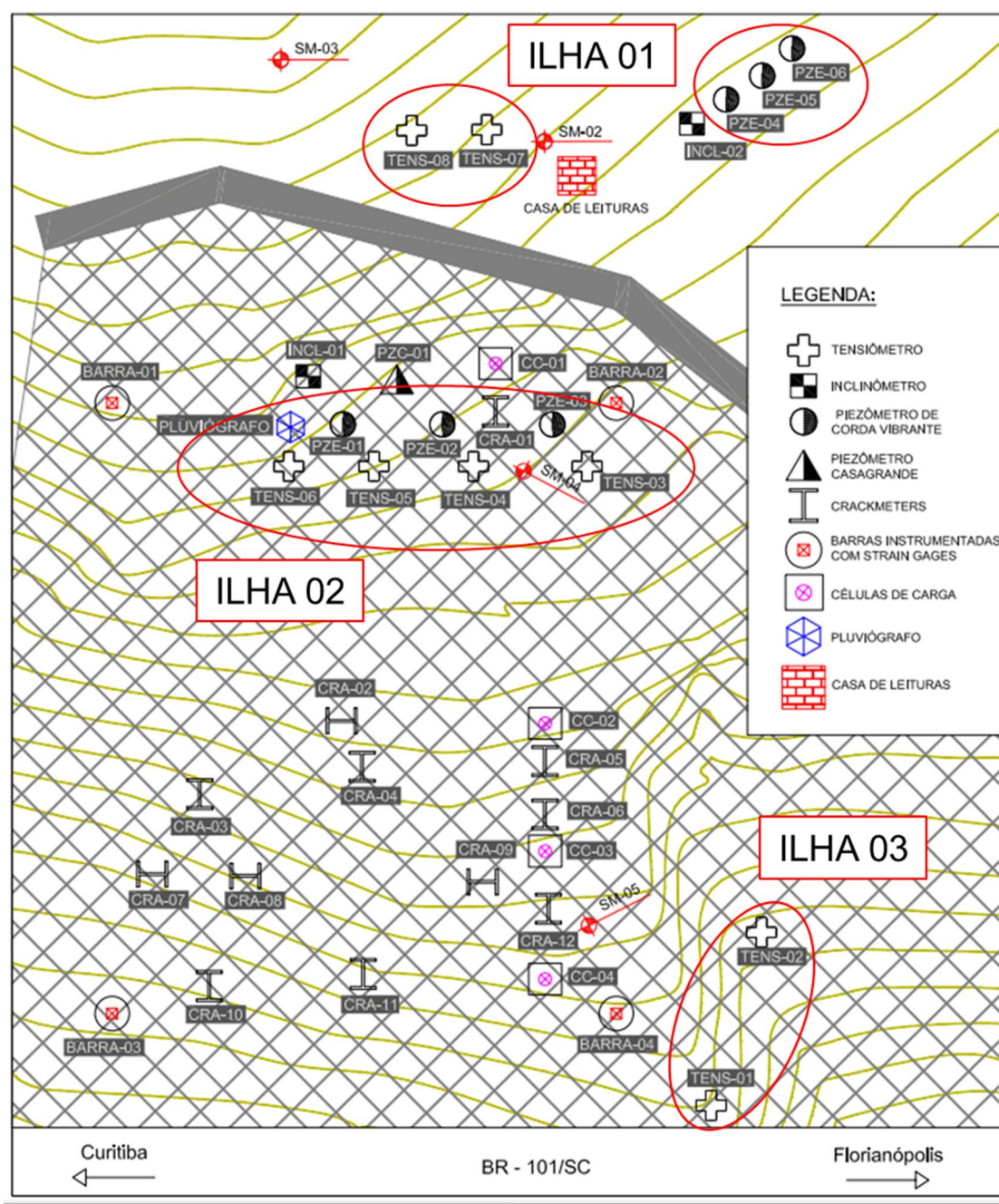


FONTE: SESTREM (2012)

Maiores informações técnicas sobre os instrumentos instalados no campo de estudo desta dissertação foram definidos e estão contidas na pesquisa de

Sestrem (2012). A FIGURA 35 apresenta um croqui com a instalação dos instrumentos.

FIGURA 35 – CROQUI DE INSTALAÇÃO DOS INSTRUMENTOS



FONTE: ADAPTADO DE SESTREM (2012)

A QUADRO 4 apresenta discriminadamente os equipamentos por ilha e suas respectivas profundidades de instalação.

QUADRO 4– PROFUNDIDADE DE INSTALAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

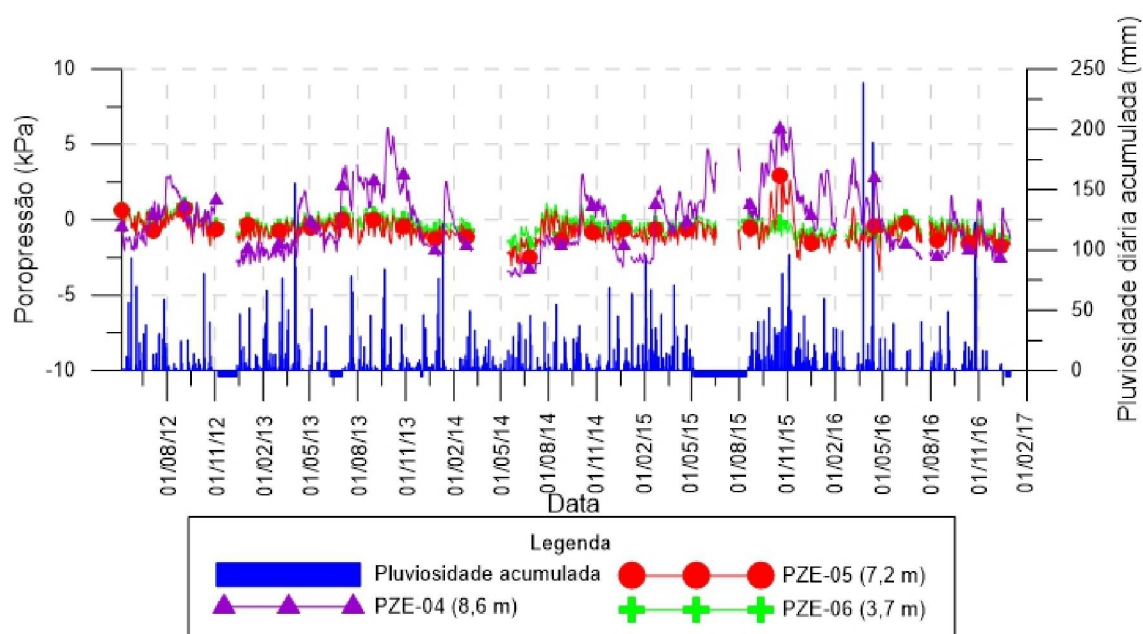
Ilha de instalação	Equipamento	Profundidade de instalação (m)
03	TENS-01	1,00
	TENS-02	2,00
02	TENS-03	0,50
	TENS-04	3,00
	TENS-05	1,00
	TENS-06	2,00
	PZE-01	8,65
	PZE-02	6,40
	PZE-03	3,90
01	TENS-07	1,00
	TENS-08	2,00
	PZE-04	8,60
	PZE-05	7,20
	PZE-06	3,70

FONTE: O AUTOR (20118)

4.1.7 SÉRIE HISTÓRICA DOS INSTRUMENTOS INSTALADOS

Os materiais utilizados nessa pesquisa consistem nas leituras apresentadas pelos piezômetros e tensiômetros instalados nas três ilhas (FIGURA 35). A profundidade de instalação de cada instrumento já foi demonstrada na QUADRO 4 e pode ser visualizada também em cada uma das legendas das figuras abaixo. Durante as análises não se utilizou as leituras do TENS-03 devido a sua grande variabilidade e comportamento divergente dos outros instrumentos. A FIGURA 36 apresenta a série histórica dos piezômetros instalados na ilha 01. O período analisado nesta dissertação foi do início do monitoramento em 2012 (Maio) até 31/12/2017.

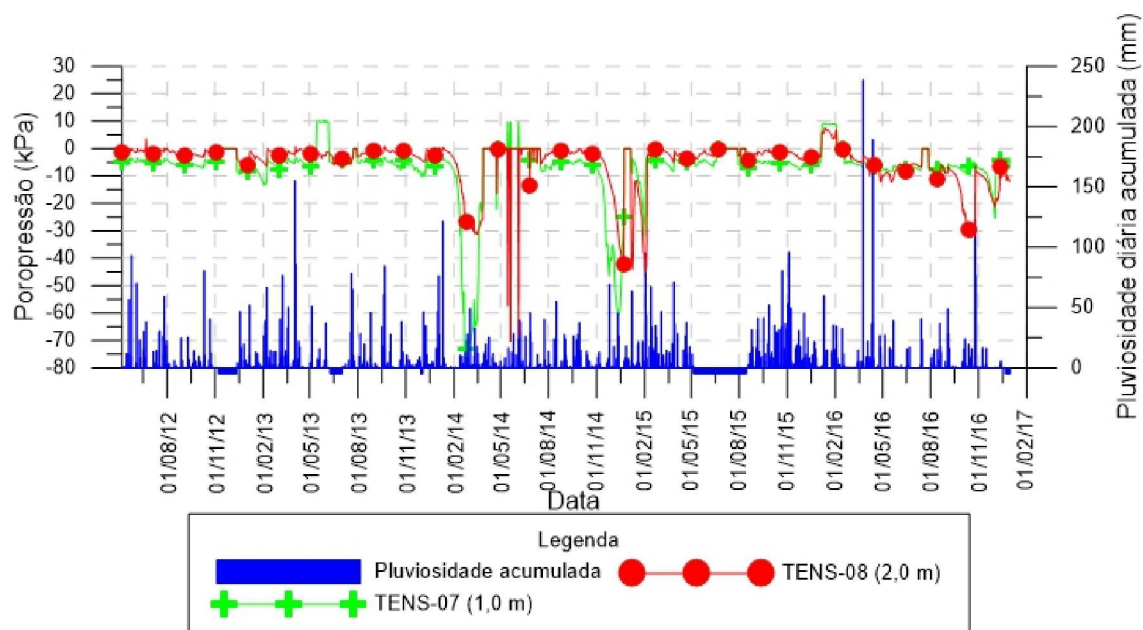
FIGURA 36 – SÉRIE HISTÓRICA DOS PIEZÔMETROS INSTALADOS NA ILHA 01



FONTE: O AUTOR (2018)

A FIGURA 37 apresenta a série histórica dos tensiômetros instalados na ilha 01.

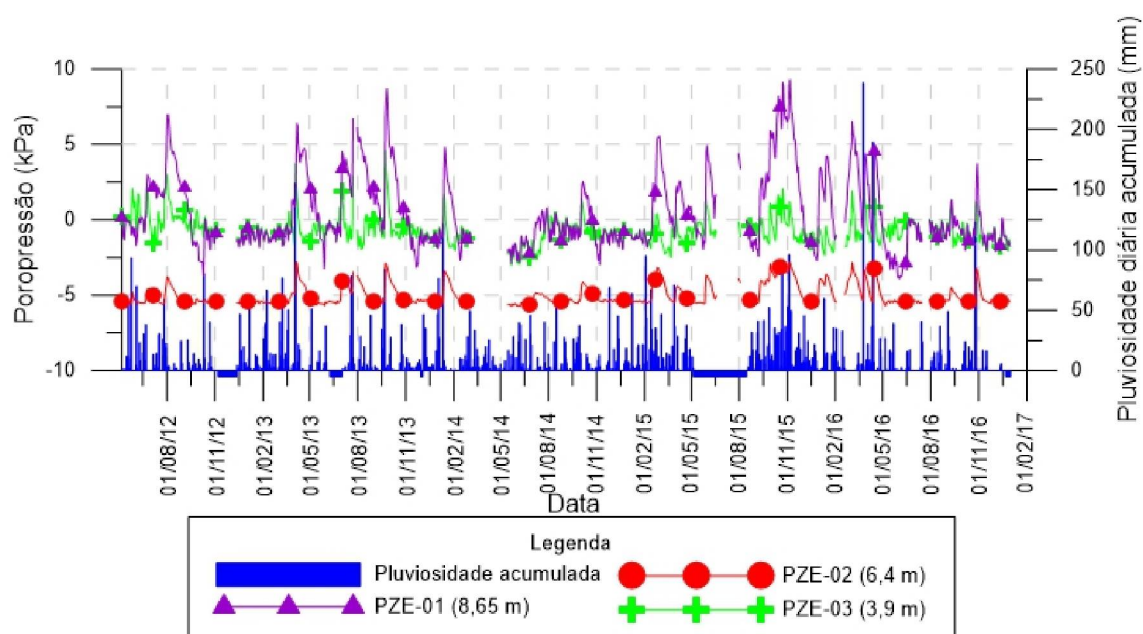
FIGURA 37 – SÉRIE HISTÓRICA DOS TENSÍOMETROS INSTALADOS NA ILHA 01



FONTE: O AUTOR (2018)

A FIGURA 38 apresenta a série histórica dos piezômetros instalados na ilha 02

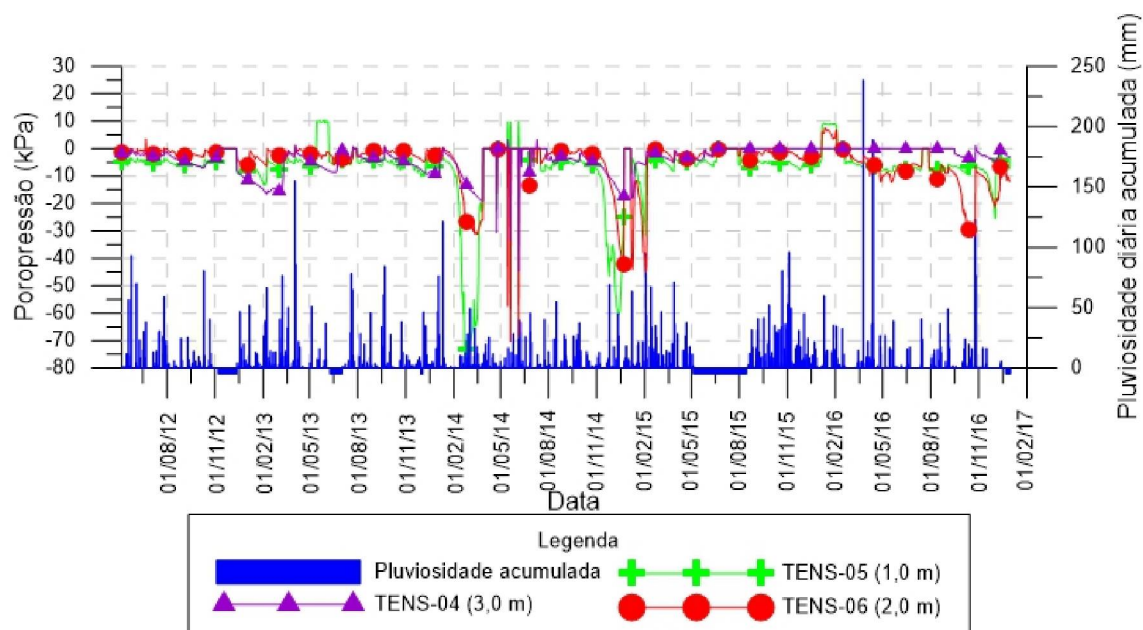
FIGURA 38 – SÉRIE HISTÓRICA DOS PIEZOMETROS INSTALADOS NA ILHA 02



FONTE: O AUTOR (2018)

Na FIGURA 39 ilustra-se a série histórica dos tensiômetros instalados na ilha 02.

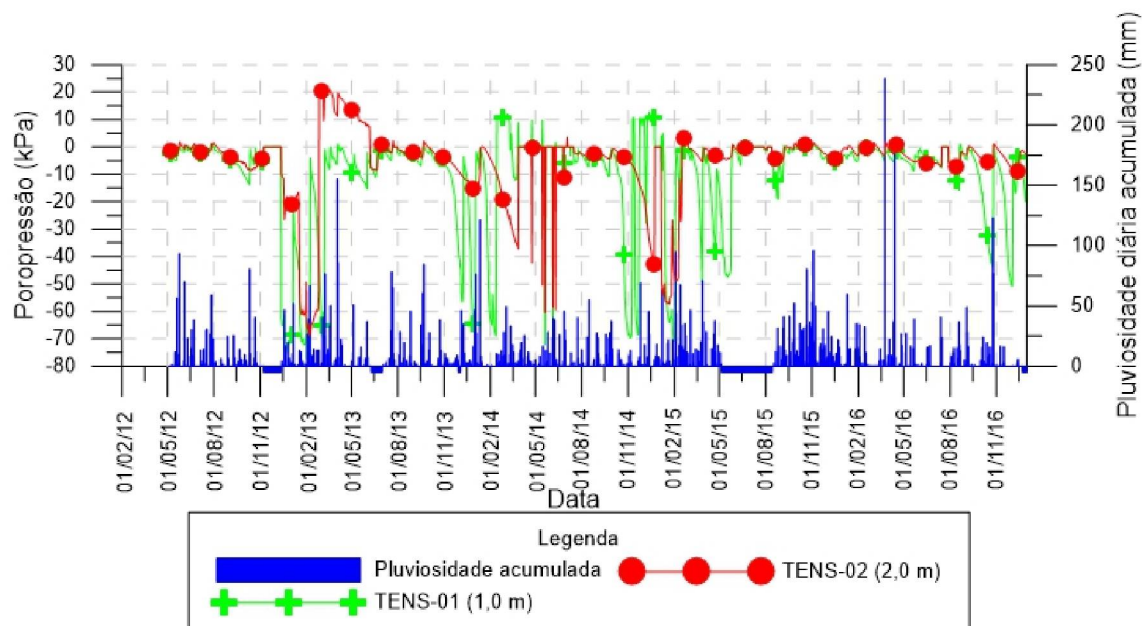
FIGURA 39 – SÉRIE HISTÓRICA DOS TENSÍMETROS INSTALADOS NA ILHA 02



FONTE: O AUTOR (2018)

E por fim, na FIGURA 40 ilustra-se a série histórica dos tensiômetros instalados na ilha 03.

FIGURA 40 – SÉRIE HISTÓRICA DOS TENSÍMETROS INSTALADOS NA ILHA 03



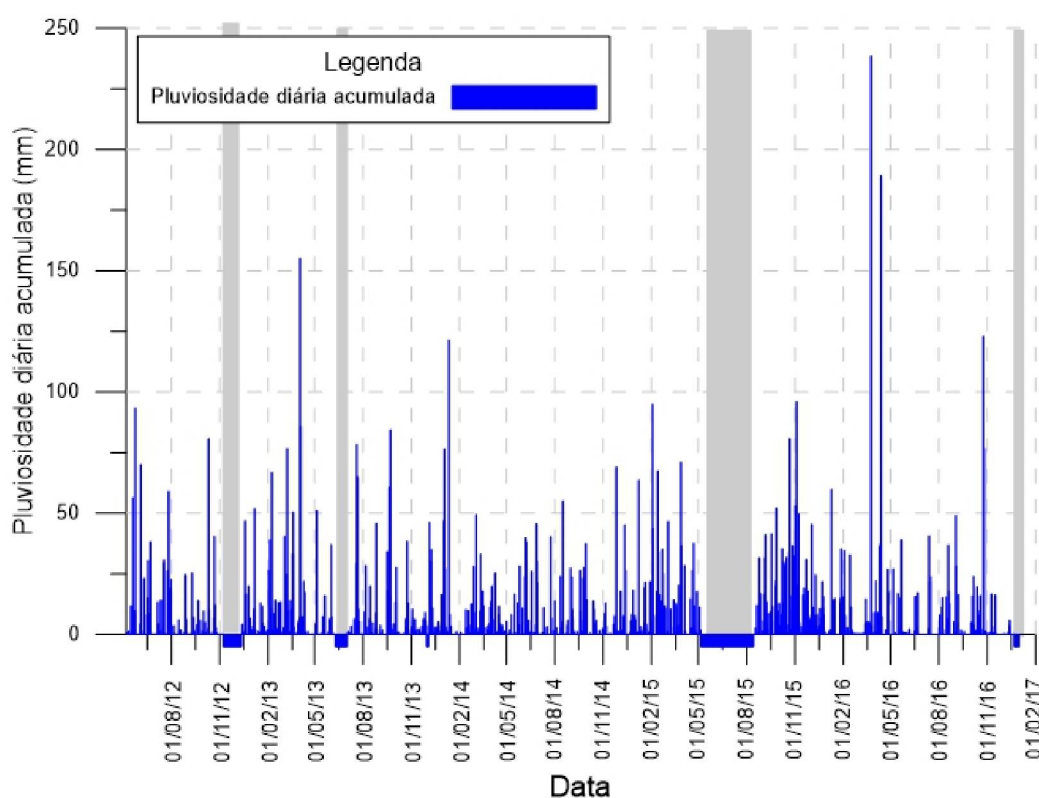
FONTE: O AUTOR (2018)

Outro material utilizado nessa pesquisa é a série histórica do pluviôgrafo instalado na área de estudo. A série histórica do pluviôgrafo em questão pode ser visualizada na FIGURA 41.

Na FIGURA 41 as hachuras em cinzas representam períodos com falha na obtenção dos dados. É possível observar que há registro de cinco intensidades com acumulados diários superiores a 100 mm, sendo que uma destas leituras apresenta um acumulado diário superior a 200 mm, conferindo a este evento o maior registro pluviométrico diário em toda a série de leitura.

Maiores considerações sobre os dados da FIGURA 41 são objeto dessa pesquisa e foram apresentados em capítulos subsequentes.

FIGURA 41 – SÉRIE HISTÓRICA DO PLUVIÓGRAFO INSTALADO NO LOCAL DE ESTUDO



FONTE: O AUTOR (2018)

González *et al.* (2017), definiram a intensidade das chuvas registradas pelo pluviômetro, onde as classificou como: Dia seco (Ds), chuva muito fraca (Cmf), chuva fraca (Cf), chuva moderada (Cmod), chuva forte (Cfo) e chuva muito forte (Cmfo). Os acumulados diários que correspondem essas classificações podem ser visualizados no QUADRO 5.

QUADRO 5 – CLASSIFICAÇÃO DA INTENSIDADE DAS CHUVAS

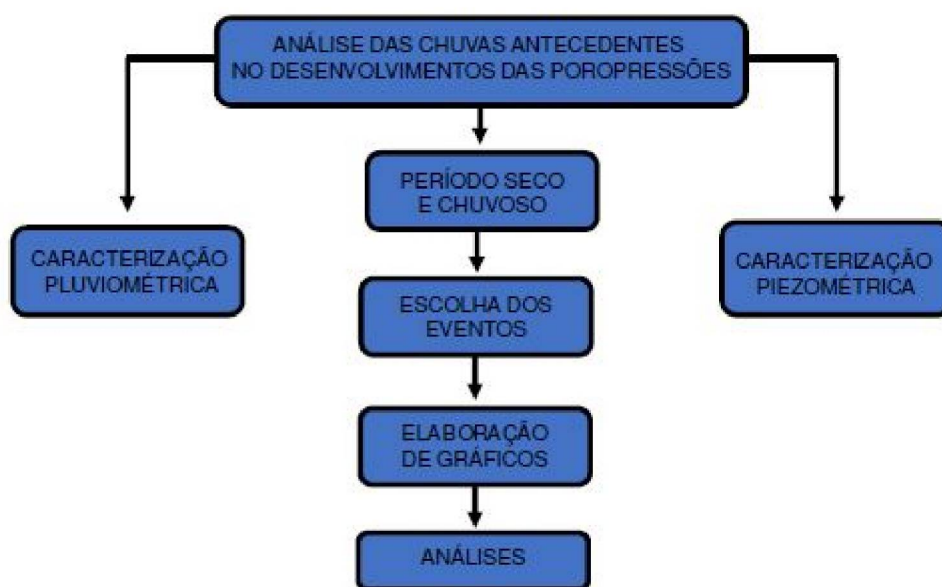
Classificação	Acumulado diário (P, mm/dia)
Ds	$P < 0,20$
Cmf	$0,20 < P < 0,60$
Cf	$0,60 < P < 3,20$
Cmod	$3,20 < P < 13,00$
Cfo	$13,00 < P < 45,60$
Cmfo	$P > 45,60$

FONTE: ADAPTADO DE GONZÁLEZ *et al.* (2017)

4.1.8 METODOLOGIA DA PESQUISA

Nesta etapa foram descritos os procedimentos metodológicos desta pesquisa. O trabalho visou compreender o desenvolvimento de poropressões sujeitas as chuvas tropicais. Para facilitar a explicação da metodologia, elaborou-se um fluxograma que pode ser visualizado na FIGURA 42.

FIGURA 42 – FLUXOGRAMA DA PESQUISA



FONTE: O AUTOR (2018)

Inicialmente, a pesquisa divide-se em dois tipos de caracterização: pluviométrica e piezométrica. A caracterização pluviométrica consistiu em identificar características dos acumulados obtidos em toda a série histórica (FIGURA 41). Nesta etapa buscou-se obter: pluviosidades acumuladas mensais, dias com registro de precipitação, intensidade média mensal, precipitação máxima diária e horária, parâmetros estatísticos da distribuição (média, desvio padrão e coeficiente de variação) buscando alcançar o entendimento da pluviosidade na região.

A caracterização piezométrica consiste em analisar os valores apresentados nas séries históricas dos equipamentos instalados na região de estudo (FIGURA 36 a FIGURA 40). As análises consistiram em analisar os

valores por ilha de instrumentos, analisando cada um dos aparelhos por profundidade, separando essas leituras pelas estações do ano, obtendo dados estatísticos para compreender essas leituras. Com esses procedimentos buscou-se compreender a amplitude dos valores medidos através de diversos períodos.

Buscando compreender o efeito das chuvas nas alterações das respostas piezométricas, foram escolhidos eventos para as análises. Devido à extensão da série histórica, não foi possível realizar a análise detalhada de todos os eventos pluviométricos com todas as classificações propostas por González *et al* (2017). Por conta disto foram avaliadas as classificações de chuvas muito fortes conforme demonstradas na QUADRO 5. Vale lembrar que os períodos analisados contêm chuvas com outras classificações. Entretanto, todos os eventos escolhidos devem ter ao menos uma chuva com classificação muito forte.

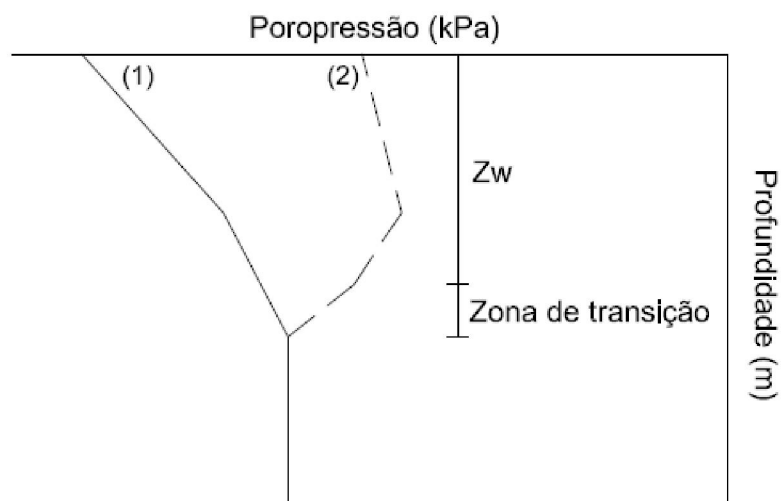
Para a escolha dos períodos analisados foram identificados períodos secos e chuvosos conforme metodologia apresentada por Rahardjo *et al.* (2008), onde analisou-se os eventos chuvosos seguidos de períodos de seca.

Conforme definições apresentadas por Rahardjo *et al.* (2008) os períodos secos e chuvosos são períodos importantes ao longo da série histórica para avaliação das leituras de poropressão. O tempo para terminar um período seco corresponde ao período onde as poropressões medidas estão nos seus menores valores, ou seja, um período sem chuva a umidade no talude é reduzida e conseqüentemente, tem-se menores valores de poropressão. Um período chuvoso é definido quando uma série de eventos pluviométricos geram o acréscimo nos valores de poropressão ao longo da encosta, gerando assim variações nas leituras piezométricas.

Conforme Sun *et al.* (1998) o acréscimo de fluxo na superfície uma frente de umedecimento será formada e gradualmente se aprofundará. Entretanto, com as leituras piezométricas registradas na encosta é possível obter a profundidade do avanço dessa frente de umedecimento com dados *in situ*, relacionando as profundidades alcançadas e possíveis alterações no lençol freático com as intensidades observadas.

Parafraseando a FIGURA 15, onde demonstra as considerações de Sun *et al.* (1998), A FIGURA 43, apresenta os perfis de poropressões típicos buscados nesse trabalho.

FIGURA 43 – TÍPICO PERFIL PERÍODO SECO E CHUVOSO



FONTE: O AUTOR (2018)

Através da FIGURA 43 ilustra-se hipoteticamente dois perfis típicos de poropressão. Podem-se observar um perfil buscado para um período seco (1) onde as leituras de poropressões encontram-se mínimas, logo a esquerda. Após um período chuvoso (2), percebe-se o aumento dessas poropressões, representativamente à direita, até uma profundidade alcançada da frente de umedecimento (Z_w), onde logo abaixo tem-se uma zona de transição.

Em cada evento, as intensidades que levaram o avanço da frente de umedecimento até a profundidade percebida pelos instrumentos são comparadas com as intensidades (I_{min}) obtidas pelo método teórico de Pradel e Raad (1993) a fim de verificar a validade dessa equação teórica para o local estudado. A EQUAÇÃO 11 será utilizada neste trabalho. Os dados de entrada da EQUAÇÃO 11 serão os seguintes:

- Profundidade da frente de umedecimento (Z_w): Profundidade do equipamento que registrar um acréscimo nos valores de poropressão devido a infiltração de águas pluviais;

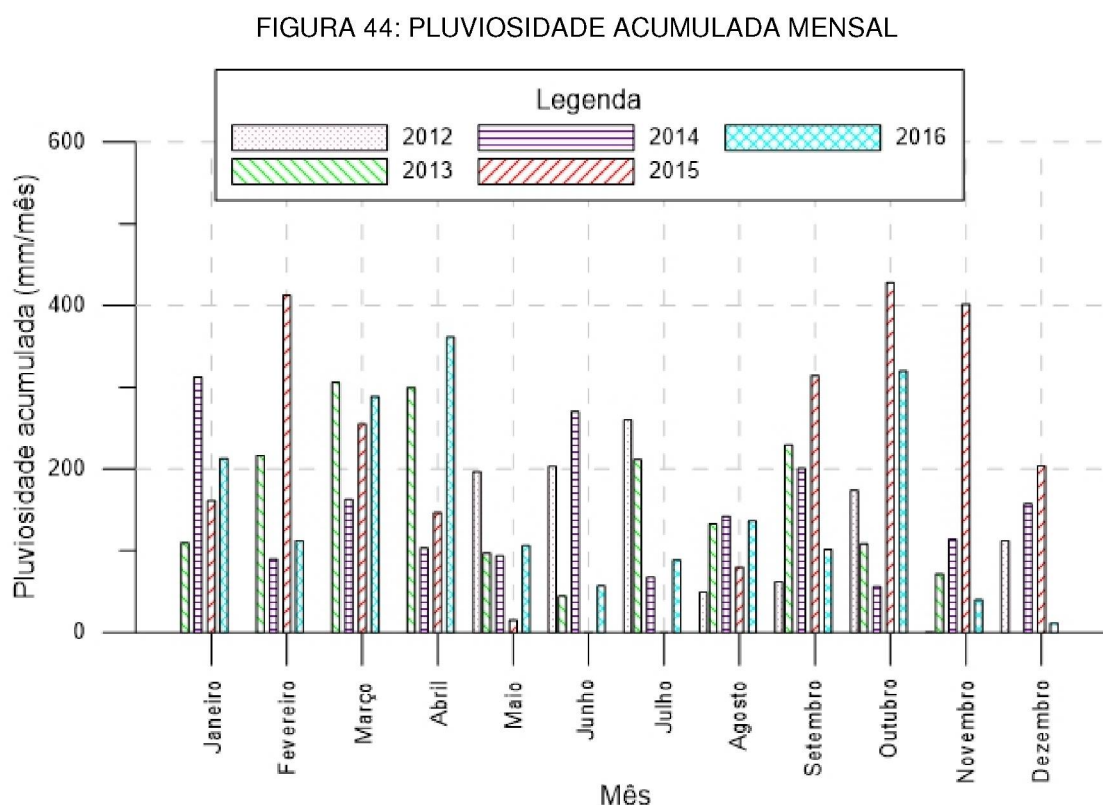
- Duração da chuva (T_{min}): duração da chuva em horas do evento analisado;
- Umidade volumétrica saturada (θ_s): definida conforme a curva de retenção demonstrada na FIGURA 31;
- Umidade volumétrica inicial (θ_i): Será a umidade correspondente a poropressão antes do avanço da frente de umedecimento obtida pela FIGURA 31;
- Sucção na frente de umedecimento (Ψ): Sucção na profundidade alcançada pela frente de umedecimento antes do evento de chuva.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a realização da presente dissertação foram analisados os efeitos das chuvas nas leituras registradas pelos tensiômetros e piezômetros. Para avaliar este efeito, inicialmente realizou-se a caracterização das leituras pluviométricas e piezométricas que serão abordados neste trabalho.

5.1 CARACTERIZAÇÃO PLUVIOMÉTRICA

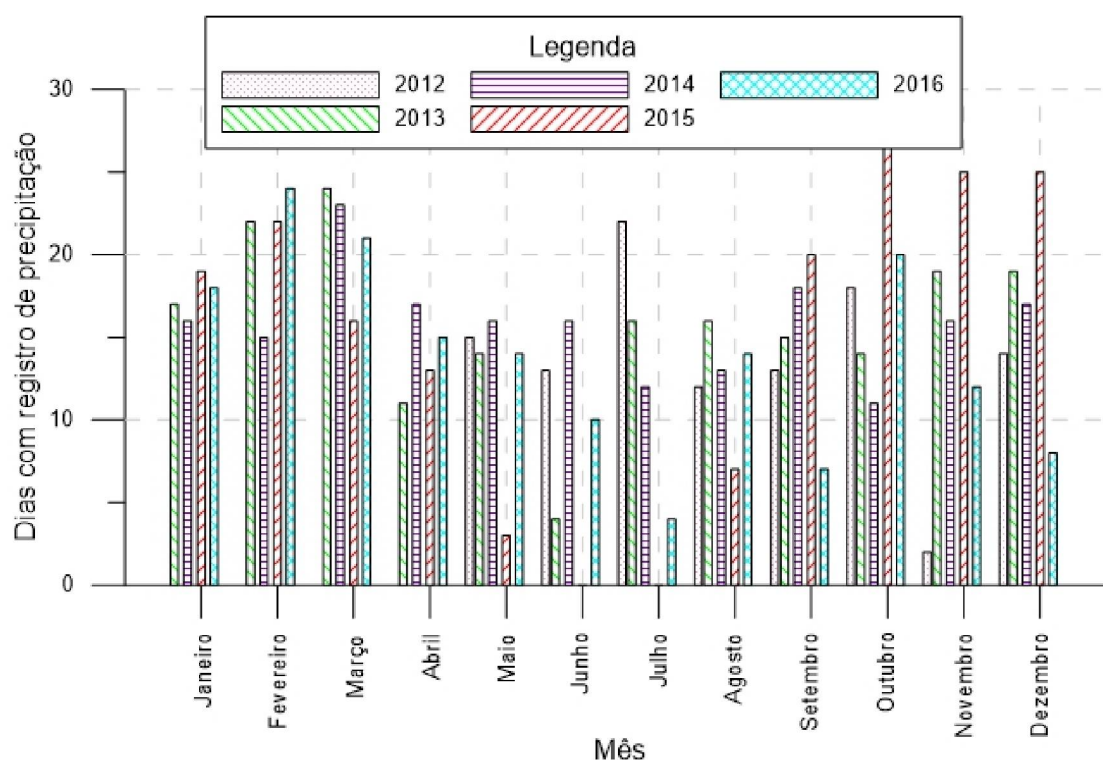
Para a compreensão das alterações nos perfis de poropressão devido às chuvas antecedentes, é de extrema importância caracterizar a pluviometria da região de estudo. Como já demonstrado, a FIGURA 41 apresenta a série histórica do pluviógrafo instalado no sítio de estudo. Os meses em que o pluviógrafo teve problemas operacionais foram os seguintes: novembro e dezembro de 2012; junho de 2013; maio, junho, julho e agosto de 2014; dezembro de 2016.



FONTE: O AUTOR (2018)

Os acumulados mensais de pluviosidade estão apresentados na FIGURA 44. Outubro de 2015 foi o mês com maior acumulado durante toda série histórica registrando-se 427 mm. O mês de novembro de 2016 possui o menor acumulado mensal registrado com 39,8 mm durante o período.

FIGURA 45 DIAS COM REGISTRO DE PRECIPITAÇÃO

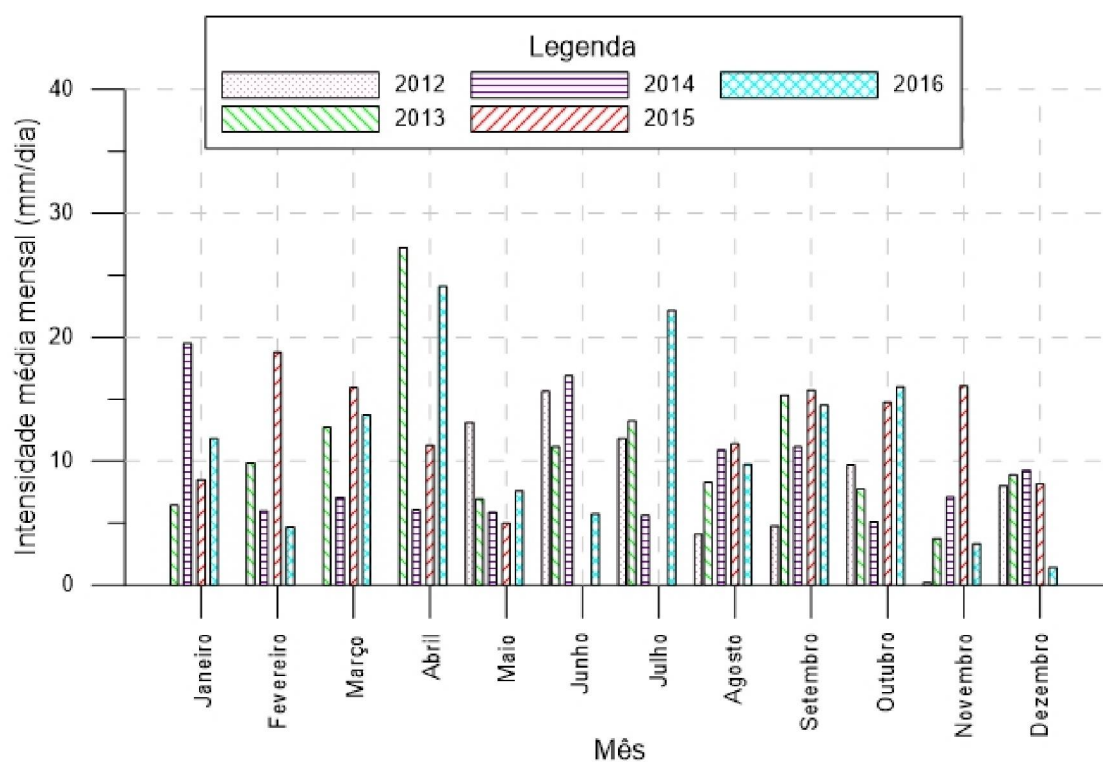


FONTE: O AUTOR (2018)

O número de dias com registros pluviométricos é ilustrado na FIGURA 45. Durante os 31 dias de outubro do ano de 2015 foram registrados 29 dias com chuva, ou seja 93,5% dos dias deste mês tiveram eventos pluviométricos. Ainda no ano que 2015, durante os meses de novembro e dezembro obteve-se em ambos os meses 25 dias com registros pluviométricos. O mês de setembro registrou apenas 7 dias com registro durante os anos de 2016.

A FIGURA 46 ilustra a intensidade média mensal. Esta medida é obtida pela relação do acumulado mensal (FIGURA 44) pelo número de dias com o registro de chuvas (FIGURA 45). O mês de abril possui as maiores intensidades médias mensais com 27,2 mm/dia em 2013 e 24,1 mm/dia em 2016. Novembro de 2013 possui a menor média mensal com 3,8 mm/dia.

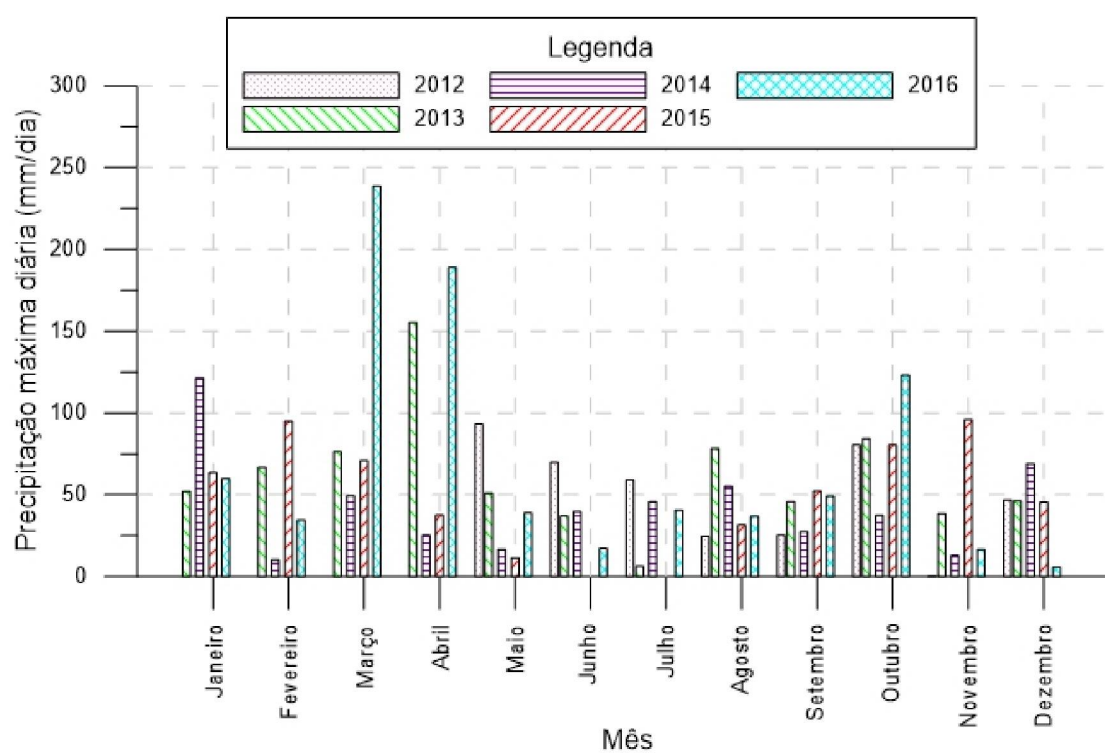
FIGURA 46: INTENSIDADE MÉDIA MENSAL



FONTE: O AUTOR (2018)

Os maiores acumulados diários em cada mês estão representados na FIGURA 47.

FIGURA 47: PRECIPITAÇÃO MÁXIMA DIÁRIA

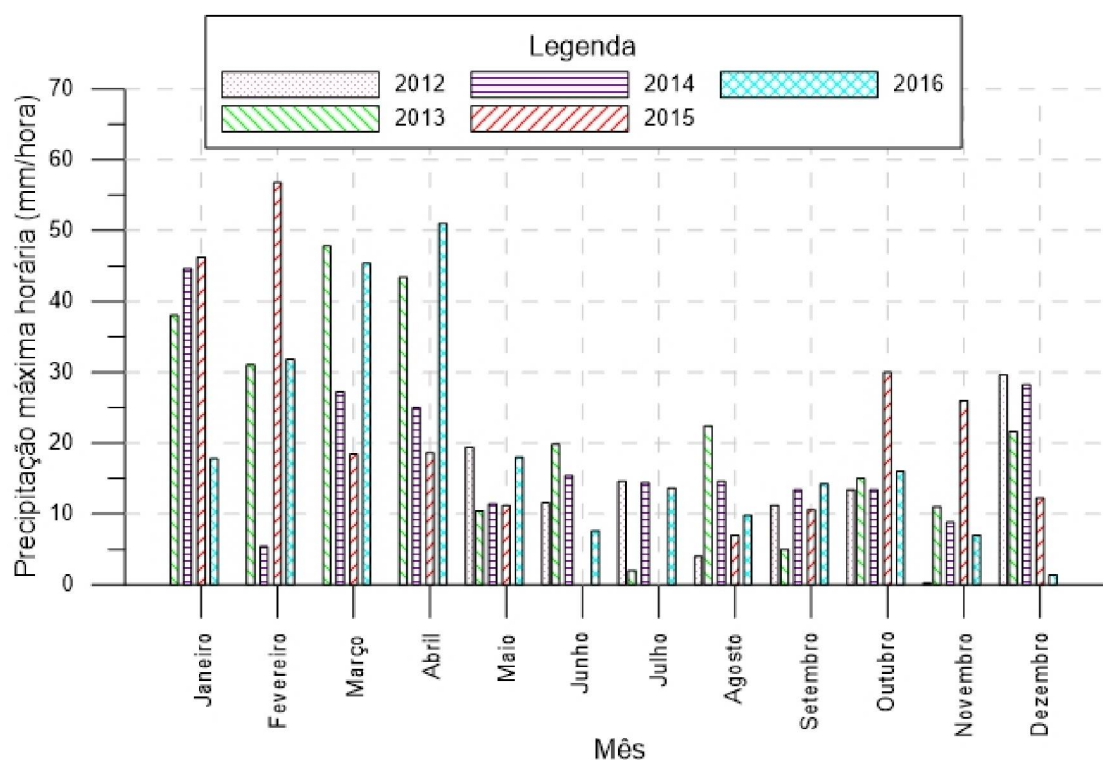


FONTE: O AUTOR (2018)

É possível visualizar na FIGURA 47 que em Março de 2016 registrou-se o maior acumulado diário com intensidade de 238,6 mm, seguido respectivamente dos meses de abril de 2016 (189,2 mm), e abril de 2013 (155,2 mm) e janeiro de 2014 (121,4 mm).

As menores intensidades diárias (FIGURA 47) em cada mês foram registradas nos meses de fevereiro de 2014 quando registrou-se o volume diário com intensidade de 10 mm, seguido do mês de maio de 2015 com intensidade máxima diária de 11,4 mm.

FIGURA 48: PRECIPITAÇÃO MÁXIMA HORÁRIA

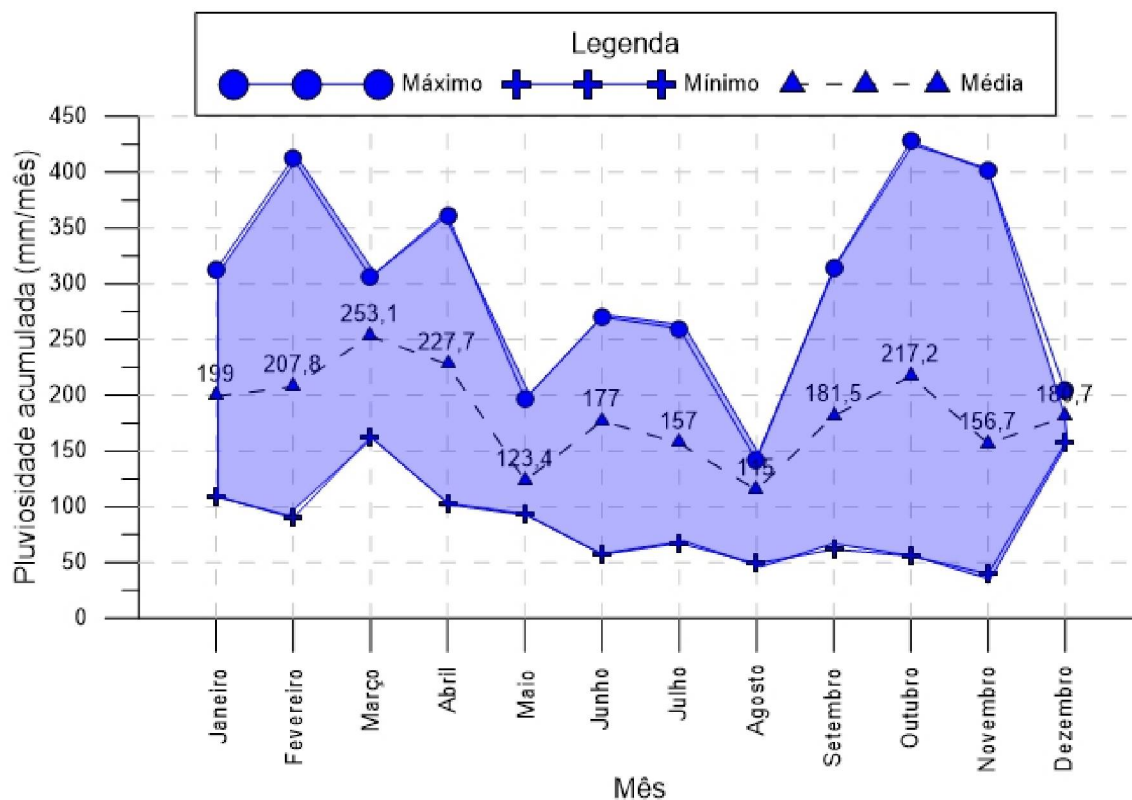


FONTE: O AUTOR (2018)

A FIGURA 48 ilustra as precipitações máximas horárias. A maior precipitação horária foi obtida no mês de fevereiro de 2015 com uma intensidade de 56,8 mm/h, seguido de 47,8 mm/h em março de 2013 e 46,2 mm/h em janeiro de 2015. Analisando-se a média das precipitações máximas obtém-se uma intensidade máxima média por hora de 19 mm/h.

A FIGURA 49 indica os valores máximos, mínimos e médias dos acumulados mensais. É possível observar que, em termos médios, a partir do mês de março inicia-se uma queda dos acumulados mensais. Sendo os meses de julho, agosto e novembro com as menores médias mensais. Os meses de fevereiro, março e abril, entretanto apresentam as maiores médias mensais.

FIGURA 49: VALORES MÁXIMO, MÍNIMOS E MÉDIAS DE ACUMULADOS MENSALIS

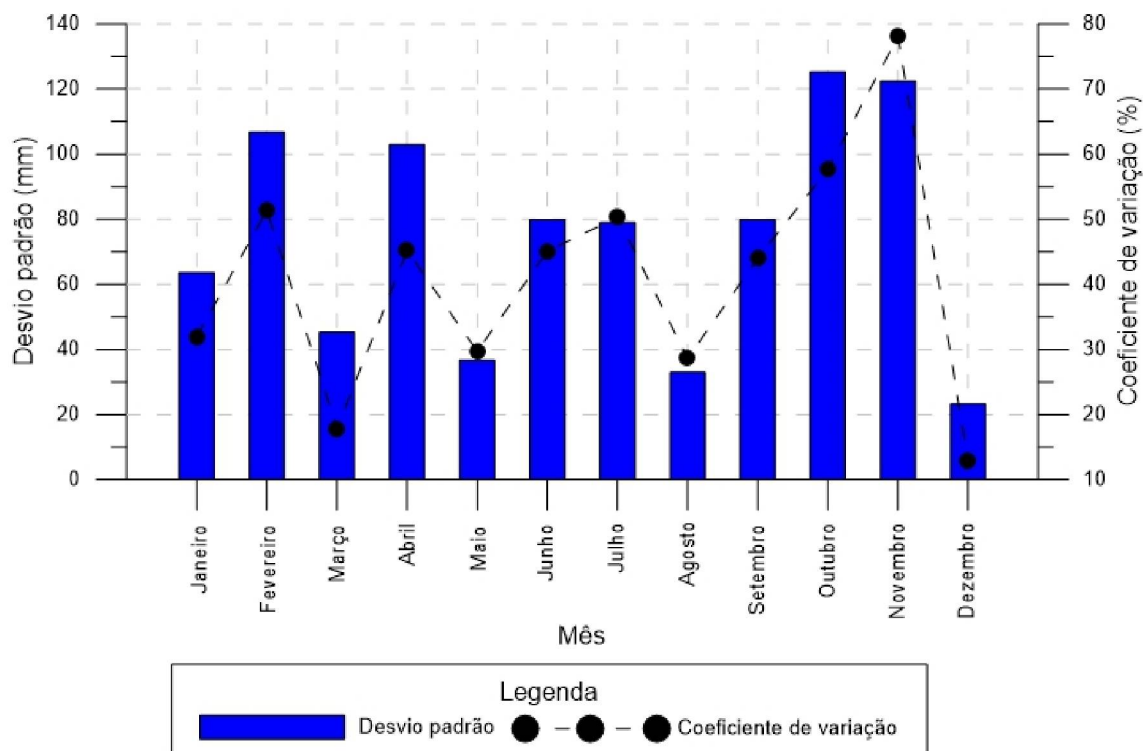


FONTE: O AUTOR (2018)

Entretanto, observa-se uma grande divergência entre os máximos e mínimos medidos. O mês de fevereiro, por exemplo, registra o seu menor acumulado mensal na casa de 100 mm e o seu máximo acumulado superior a 400 mm. O mês de novembro apresenta parâmetros de máximo e mínimo muito semelhantes aos registrados em fevereiro. A discrepância é ainda maior no mês de outubro onde o menor valor mensal registrado é próximo a 50 mm e o maior superior a 400 mm, obtendo uma variação entre esses dois valores de em torno de 700%. Para isto, se faz necessário não apenas analisar os valores máximos, mínimos e médios de cada mês e sim analisar os parâmetros estatísticos de desvio padrão e coeficiente de variação.

Os parâmetros de coeficiente de variação e desvio padrão para os registros mensais estão apresentados na FIGURA 50.

FIGURA 50: COEFICIENTE DE VARIAÇÃO E DESVIO PADRÃO DOS REGISTROS MENSALIS



FONTE: O AUTOR (2018)

Conforme demonstrado na FIGURA 50, os meses mais previsíveis quanto aos acumulados mensais são os meses de dezembro, março e agosto com coeficiente de variação em torno de 13%, 18% e 27% respectivamente. Observa-se uma variabilidade muito grande nos outros meses chegando a variações de 78% em novembro e 58% em outubro. Tal fato, corrobora a influência dos ciclos de chuva nos registros pluviométricos. As sazonalidades, no que tange a anos secos e chuvosos, influenciam diretamente nos acumulados mensais.

5.2 CARACTERIZAÇÃO PIEZOMÉTRICA

É imprescindível caracterizar as leituras de poropressão registradas pelos piezômetros e tensiômetros nos diversos ciclos do ano. Para isto, foi apresentada nesta seção os valores máximos e mínimos de cada equipamento

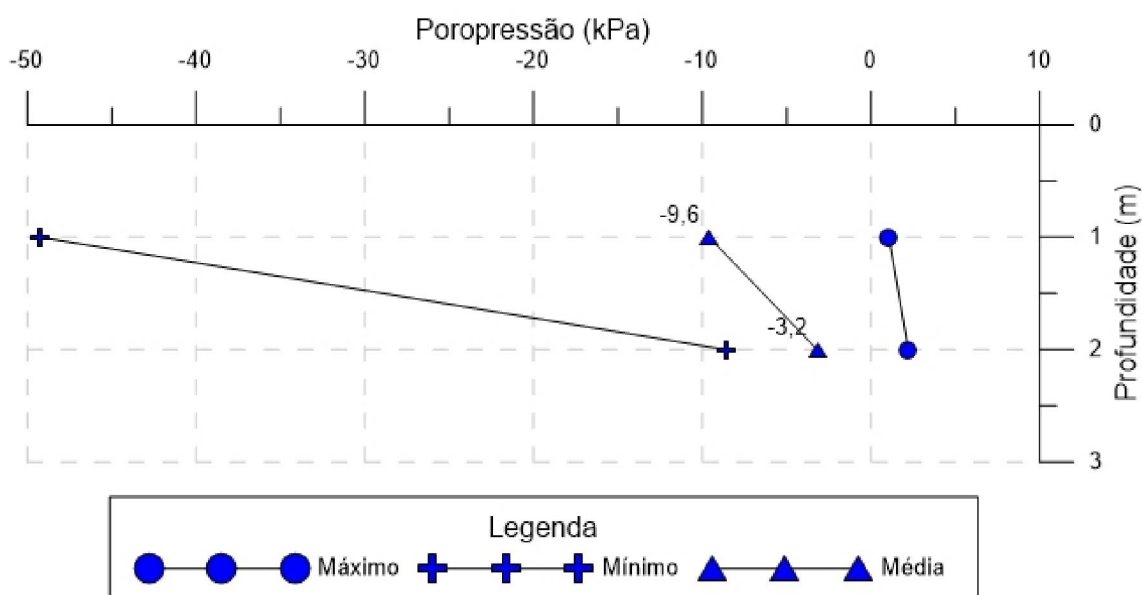
em sua respectiva ilha e profundidade, juntamente com comentários dos valores de desvio padrão e coeficiente de variação.

Das três ilhas existentes no Morro do Boi, iniciou-se a caracterização pela ilha 03, contida na porção inferior do maciço. Os instrumentos ali instalados foram descritos na QUADRO 4. A série histórica de todos os instrumentos pode ser visualizada da FIGURA 36 até a FIGURA 40.

5.2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ILHA 03

A FIGURA 51 apresenta os parâmetros máximos, mínimos e médios para a estação Outono. A um metro de profundidade (TENS-01) percebem-se um registro mínimo de poropressão na faixa de -50 kPa. Este valor é resultante dos primeiros dias após o verão onde a incidência solar sobre as plantas é maior e possivelmente o fenômeno da evapotranspiração fazendo que as poropressões sejam menores na região vadosa. É possível observar que a média dos valores é obtida em torno de -9,6 kPa.

FIGURA 51 – VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIAS REGISTRADOS DURANTE O OUTONO NA ILHA 03

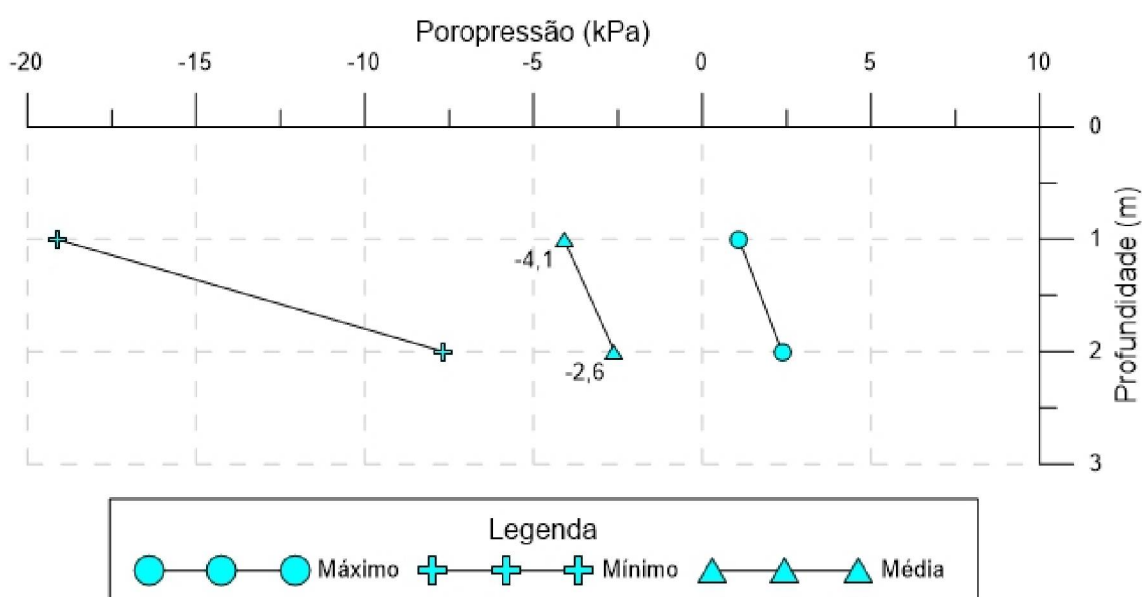


FONTE: O AUTOR (2018)

Ainda analisando os dados da FIGURA 51, observa-se que há pouca variação nas leituras na profundidade dois metros (TENS-02). A média situa-se em -3,2 kPa.

A FIGURA 52 apresenta os valores máximos, mínimos e médios para a estação inverno. Observa-se, a um metro de profundidade (TENS-01), variação entre o máximo e o mínimo valor em torno de 20%. Nesta estação, percebe-se que os valores mínimos de poropressão no primeiro metro são maiores que os registrados na estação anterior. A dois metros de profundidade (TENS-02) não é percebido uma variação entre os máximos e mínimos em relação a estação outono. A média situa-se em -2,6 kPa.

FIGURA 52 - VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIAS REGISTRADOS DURANTE O INVERNO NA ILHA 03

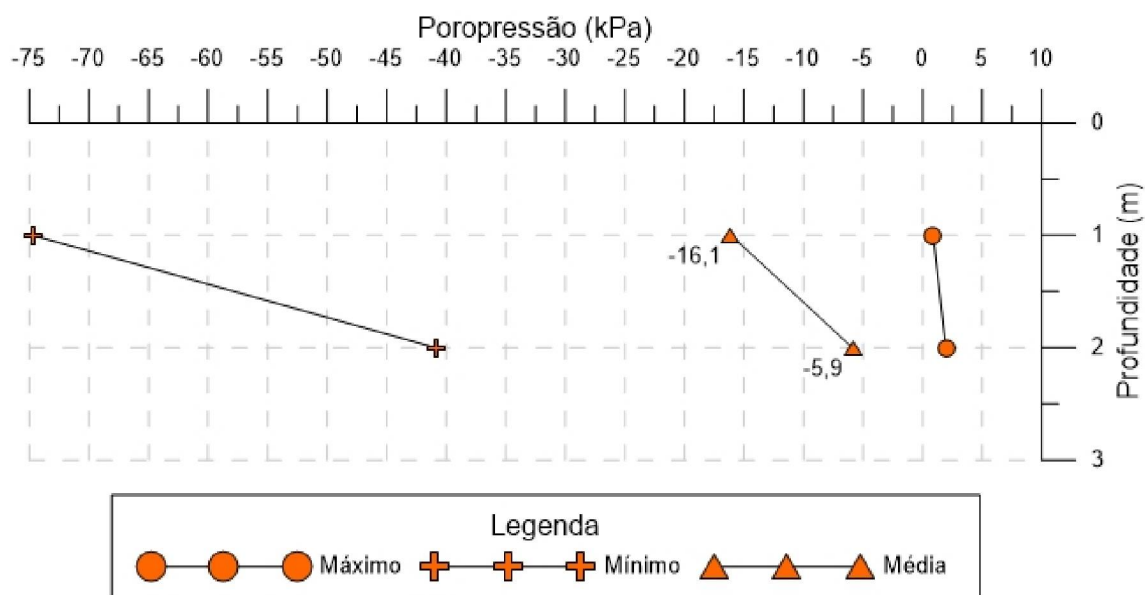


FONTE: O AUTOR (2018)

A FIGURA 53 explana sobre os valores máximos, mínimos e médias obtidos na estação da Primavera. A um metro observam-se menores valores de poropressão, representando a menor leitura para esta profundidade em torno de -75 kPa. Com o aumento da incidência solar, o processo de retirada de água do solo, a partir da evapotranspiração é intensificado e menores valores de poropressão são registrados tanto a um como a dois metros. O processo de redução da umidade por conta da evapotranspiração apresentado por Joly *et al.* (2016) se faz presente nessas condições. Dessa maneira, as médias

apresentadas são maiores que nos outros casos. A um metro registra-se uma média de -16,1 kPa. Para o segundo metro registrou-se uma média de -5,9 kPa.

FIGURA 53 - VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIAS REGISTRADOS DURANTE A PRIMAVERA NA ILHA 03

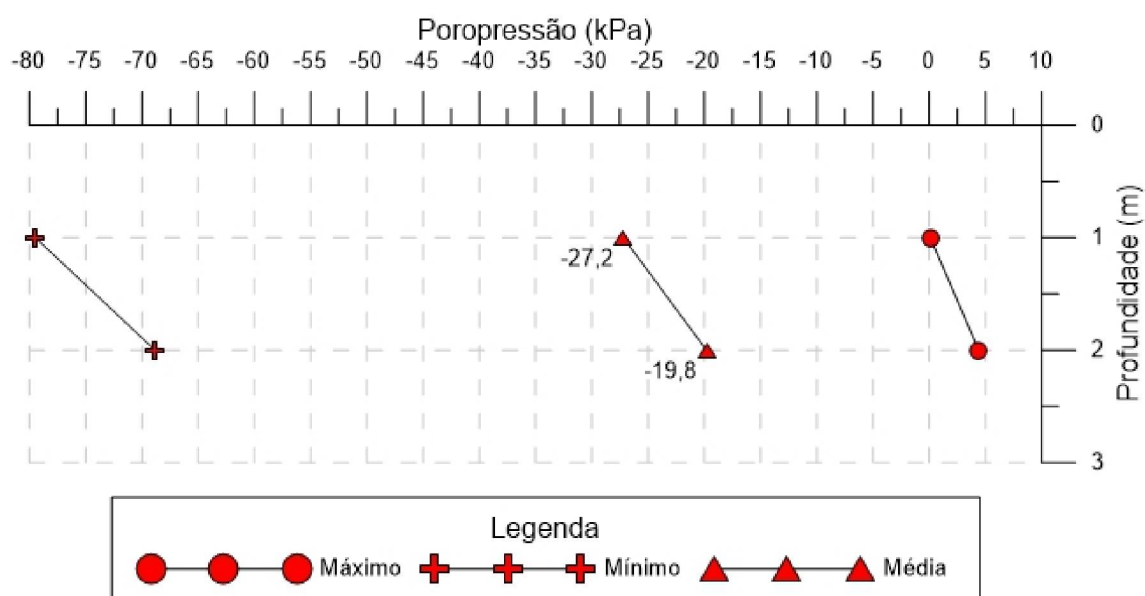


FONTE: O AUTOR (2018)

A FIGURA 54 ilustra os valores máximos, mínimos e médios para a estação verão. Percebe-se nesta estação os menores valores de poropressão tanto para o instrumento instalado a um como para dois metros. As médias para um e dois metros são: -27,2 kPa, -19,8 kPa respectivamente.

Em resumo, observa-se que há uma menor amplitude nas leituras das estações inverno e outono. Percebe-se, de uma forma geral, que as estações verão e primavera possuem menores médias aos registrados no outono e inverno. Este fato, provavelmente, é devido às chuvas e incidência solar superior na estação verão e primavera.

FIGURA 54 - VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIAS REGISTRADOS DURANTE O VERÃO NA ILHA 03

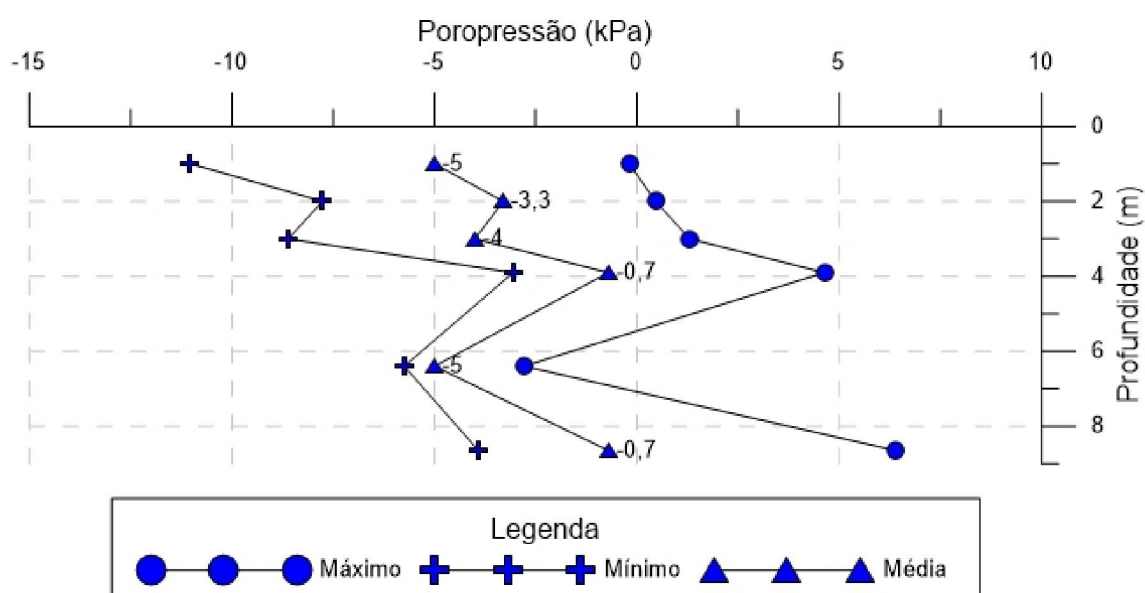


FONTE: O AUTOR (2018)

5.2.2 CARACTERIZAÇÃO DA ILHA 02

A caracterização da Ilha 02 inicia-se pela estação outono. Na FIGURA 55 ilustram-se os valores máximos, mínimos e médios para esta estação.

FIGURA 55 - VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIAS REGISTRADOS DURANTE O OUTONO NA ILHA 02

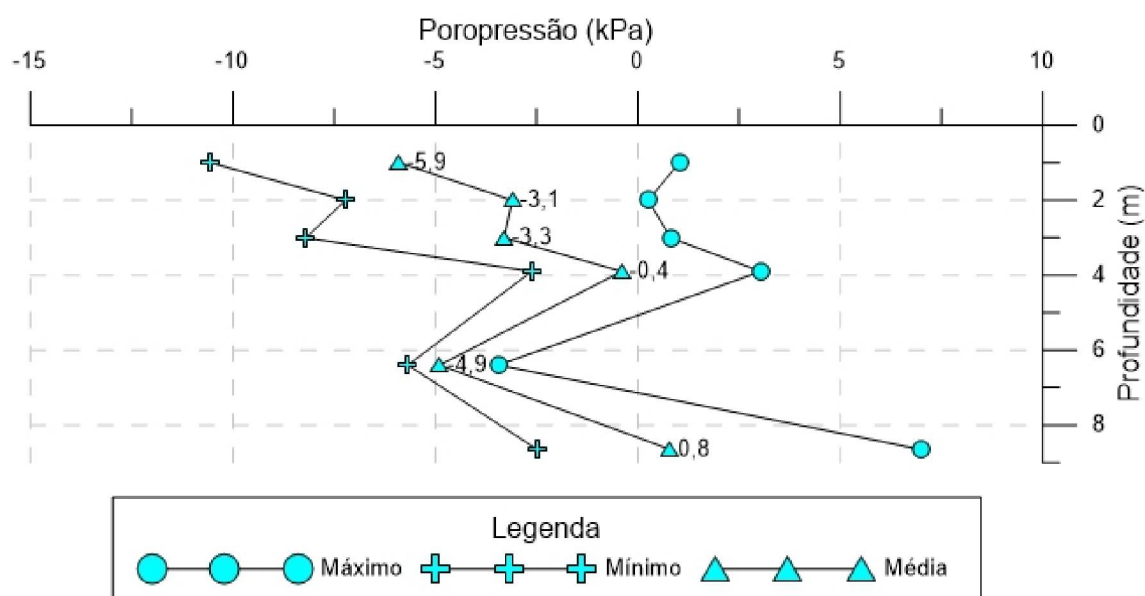


FONTE: O AUTOR (2018)

Conforme a FIGURA 55 observa-se que não há nenhum registro inferior a -12 kPa. A um metro de profundidade (TENS-05) percebe-se uma amplitude nos valores de cerca de 10 kPa. A média para esta profundidade é de -5 kPa. No segundo metro (TENS-06), a amplitude é de cerca de 7 kPa, obtendo uma média de $-3,3$ kPa. A três metros de profundidade está instalado o TENS-04 com uma amplitude de cerca 9 kPa, média de -4 kPa.

O PZE-03 instalado a três metros e noventa centímetros apresenta uma amplitude de cerca de 7 kPa e um valor máximo registrado da ordem de 4,6 kPa. Como nos instrumentos registrados logo acima (TENS-04) e logo abaixo (PZE-02) não se registram valores com esta magnitude. Possivelmente pode haver uma faixa de percolação nesta profundidade que faz com que se alcance leituras nesta magnitude. A média para este piezômetro é calculada em $-0,7$ kPa. O instrumento instalado a 6,4 metros (PZE-02) possui a menor amplitude dentre os instrumentos com cerca de 3 kPa. Apresenta uma média de -5 kPa. Em contrapartida, o instrumento instalado a 8,65 metros (PZE-01) apresenta uma média de $-0,7$ kPa.

FIGURA 56 - VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIAS REGISTRADOS DURANTE O INVERNO NA ILHA 02



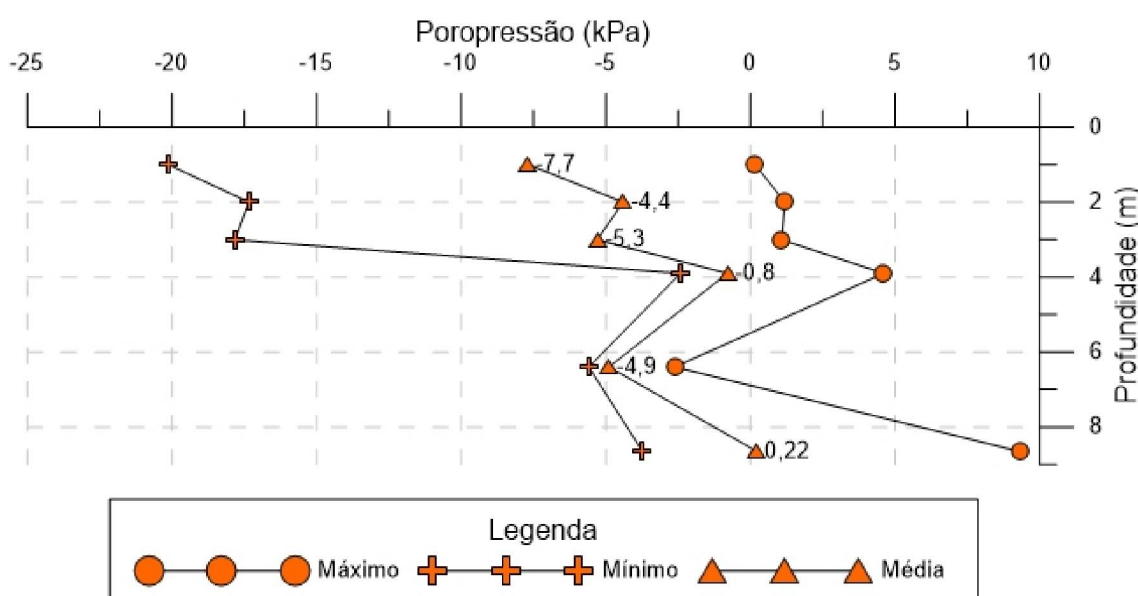
FONTE: O AUTOR (2018)

As considerações para a estação outono (FIGURA 55), descrita acima, são muito semelhantes a estação inverno, apresentada na FIGURA 56. Observa-

se que não há nenhum valor de poropressão inferior a -11 kPa. O instrumento instalado a um metro de profundidade (TENS-05) possui uma média de -5 kPa. O TENS-06 instalado a dois metros de profundidade possui uma média de -3,3 kPa. O equipamento situado a três metros de profundidade (TENS-04) possui uma média de -4 kPa. O PZE-03 (instalado a 3,9 metros) apresenta uma média de -0,7 kPa. O PZE-02 (instalado a 6,4 m) possui uma média de -5 kPa. O PZE-01 (instalado a 8,65 m) possui uma média de -0,7 kPa. As possíveis explicações para tais variações foram explicadas na estação outono desta ilha.

A FIGURA 57 apresenta os valores máximos, mínimos e médias para os instrumentos da ilha 02 na estação primavera. Observa-se nos três primeiros metros uma amplitude superior aos apresentados no outono (FIGURA 55) e inverno (FIGURA 56). Como já discutido, essas amplitudes são maiores na região vadosa com a chegada da. A um metro de profundidade calcula-se uma média de -5,9 kPa. A dois metros a média possui intensidade de -3,1 kPa. A três metros para o TENS-04 obtém-se uma média de -3,3 kPa. As considerações para os instrumentos PZE-01, PZE-02 e PZE-03 continuam as mesmas das explanadas nos parágrafos anteriores. Observa-se a 3,9 metros uma média de -0,4 kPa. O instrumento a 6,4 metros registra uma média de -4,9 kPa. O instrumento a 8,65 metros registra uma média de -0,8 kPa.

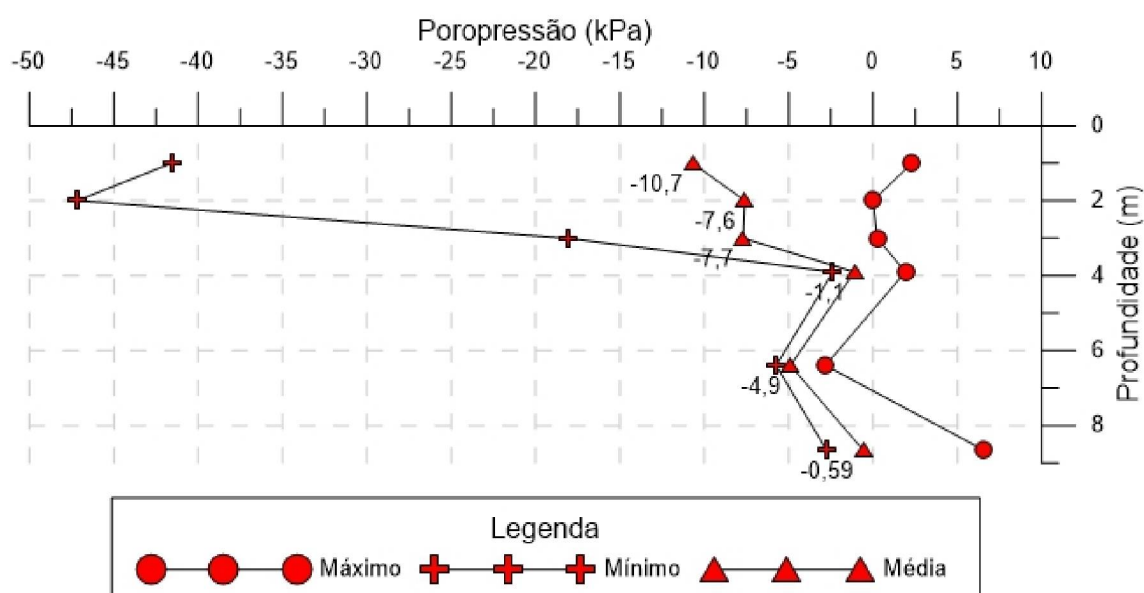
FIGURA 57 - VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIAS REGISTRADOS DURANTE A PRIMAVERA NA ILHA 02



FONTE: O AUTOR (2018)

A FIGURA 58 ilustra os valores máximos, mínimos e médios durante o verão para os instrumentos instalados na ilha 02. Assim, como o esperado, nesta estação registram-se os menores valores de poropressão e as maiores amplitudes e coeficientes de variação dos equipamentos instalados na zona vadosa. Como já relatado, provavelmente o regime de chuva associado as grandes incidências solares causam esse efeito nas leituras nesta estação. Registra-se a um metro de profundidade um média de -7,7 kPa. Aos dois metros registra-se uma média de -4,4 kPa. Aos 3 metros registra-se uma média de -5,3 kPa. Os piezômetros apresentam o mesmo comportamento das estações anteriores, valendo para estes, as considerações já realizadas nos parágrafos anteriores. O instrumento a 3,9 metros registra uma média de 0,8 kPa. Aos 6,4 metros registra-se uma média de -4,9 kPa. O instrumento instalado a 8,65 metros possui uma média de 0,22 kPa.

FIGURA 58 - VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIAS REGISTRADOS DURANTE O VERÃO NA ILHA 02



FONTE: O AUTOR (2018)

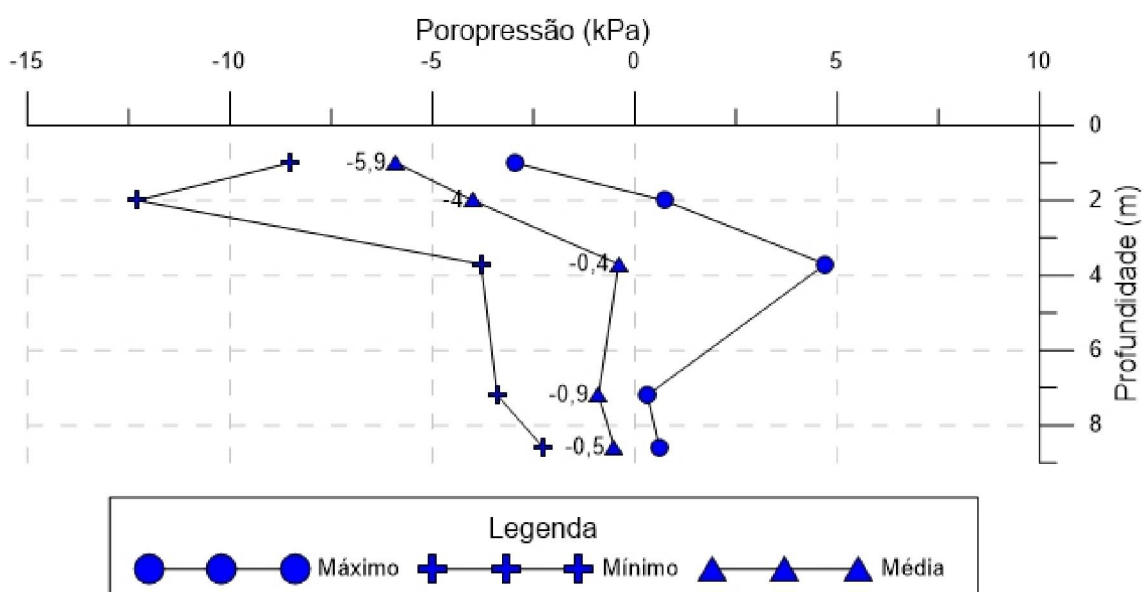
Em suma, observa-se nas estações outono e inverno, para as camadas superiores, pequenas variações nas leituras de poropressão. Acredita-se que a chegada das estações mais quentes e chuvosas resulte maiores variações nas leituras situadas na região vadosa. Os piezômetros instalados nesta ilha apresentam comportamento muito similar em todas as estações. Provavelmente,

as leituras a 3,9 metros sofrem influência do fluxo de água interno do maciço e o instrumento a 8,65 metros sofre os efeitos das variações do lençol freático. Já o instrumento instalado a 6,4 metros, mantém constantemente pequenas variações pelo fato de possivelmente não ser acometido pela percolação de água notada no instrumento acima e nem sofre influência com variações sazonais como o instrumento situado logo abaixo.

5.2.3 CARACTERIZAÇÃO DA ILHA 01

A seguir, realizou-se a caracterização da última ilha a ser analisada. A ilha 01, está localizada na porção superior em relação as outras ilhas. A FIGURA 59 ilustra os valores máximos, mínimos e médias durante o Outono. Como já observado nas outras ilhas, a amplitudes das leituras máximas e mínimas são de aproximadamente 5 kPa no primeiro metro e de 12 kPa no segundo metro. Observa-se no primeiro metro uma média de -5,9 kPa. No segundo metro a média calculada possui intensidade de -4,0 kPa. Análogo ao equipamento da ilha 02 instalado a 3,9 metros (PZE-03), o equipamento da ilha 01 (PZE-06) instalado a 3,7 metros possui grande variabilidade nas leituras.

FIGURA 59 - VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIAS REGISTRADOS DURANTE O OUTONO NA ILHA 01

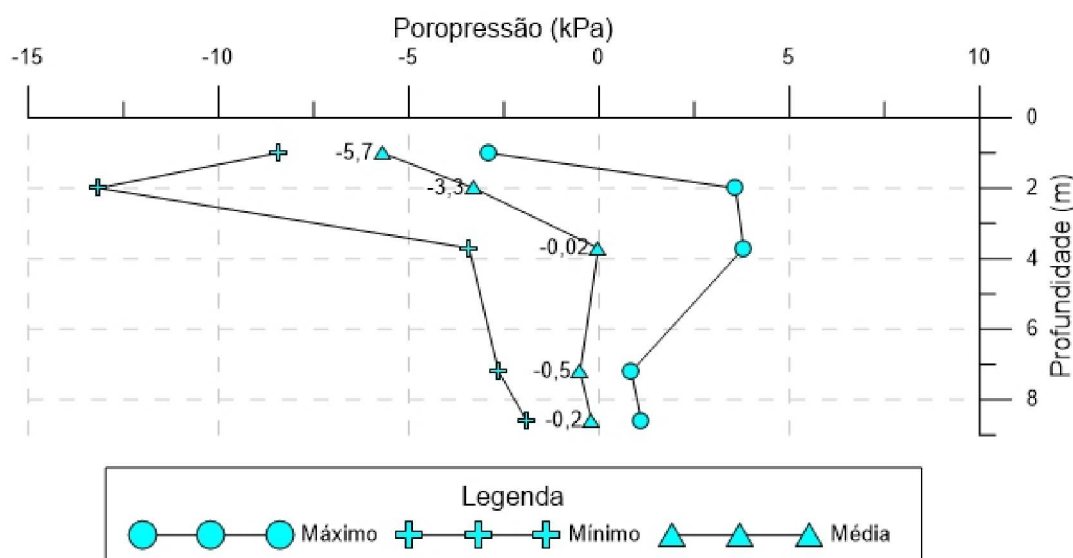


FONTE: O AUTOR (2018)

Acredita-se, por estar em profundidade aproximada ao PZE-03 (3,9 metros de profundidade) o PZE-06 (3,7 metros de profundidade) está sujeito possivelmente por uma percolação de água no interior do maciço. Registra-se para o PZE-06 (3,7 metros). O instrumento instalado na profundidade de 7,2 metros é o PZE-05. Acredita-se que assim como o equipamento situado abaixo dele o PZE-06 (8,6 metros) as leituras sofrem alterações possivelmente devido as variações do lençol freático. Registra-se para o PZE-05 uma média de -0,9 kPa e para o PZE-06 (8,6 metros) registra-se uma média de -0,5 kPa. Entretanto para os instrumentos em maior profundidade (PZE-05 e PZE-06) nota-se uma variação muito pequena entre a maior e menor leitura, sendo essa variação não inferior a 3 kPa.

A FIGURA 60 Ilustra os valores máximos, mínimos e médios registrado durante o inverno na ilha 01. Observa-se que o menor registrado está a dois metros de profundidade e tem intensidade de cerca de -13 kPa, nas leituras registradas nas camadas mais profundas não se registra leitura menor que -5 kPa. No primeiro metro registram-se uma média de -5,7 kPa. Aos dois metros registra-se uma média de -3,3 kPa Aos três metros e setenta centímetros de profundidade anota-se uma média de -0,02 kPa. Aos 7,2 metros registra-se uma média de -0,5 kPa E finalmente a 8,6 metros registram-se uma média de -0,2 kPa.

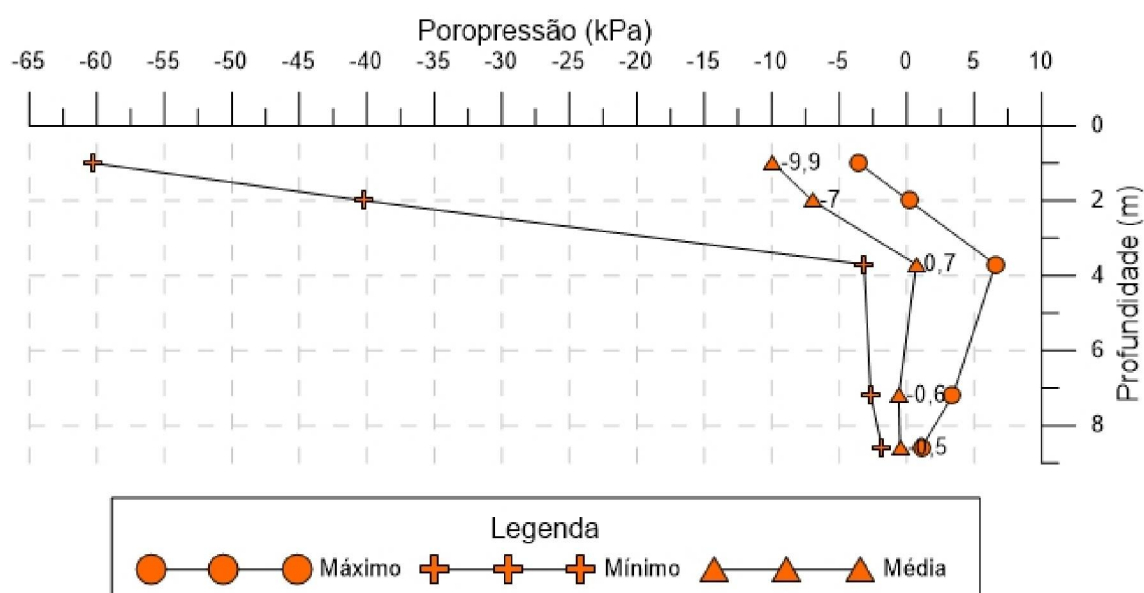
FIGURA 60 - VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIAS REGISTRADOS DURANTE O INVERNO NA ILHA 01



FONTE: O AUTOR (2018)

A FIGURA 61 ilustra, para a primavera, os valores máximos, mínimos e médios obtidos a partir das leituras registradas pelos instrumentos contidos na ilha 01. Assim como já explanado nas ilhas anteriores, as considerações feitas se repetem também para esta ilha de instrumentos. Com o chegar da primavera as leituras de poropressão atingem valores menores dos que os já registrados na estação do inverno e outono. A amplitude entre as variações se torna maior. As poropressões atingem a um metro a menor leitura com intensidade de cerca de -60 kPa, possuindo uma média de -9,9 kPa. Aos dois metros calcula-se uma média de -7,0 kPa. As considerações sobre os valores dos equipamentos instalados aos 3,7 metros, 7,2 metros e 8,6 metros continuam as mesmas das apresentadas nas estações anteriores. Aos 3,7 metros calcula-se uma média de 0,7 kPa. Aos 7,2 metros é obtido uma média de -0,6 kPa. Aos 8,6 metros, calcula-se uma média de -0,5 kPa.

FIGURA 61 - VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIAS REGISTRADOS DURANTE A PRIMAVERA NA ILHA 01

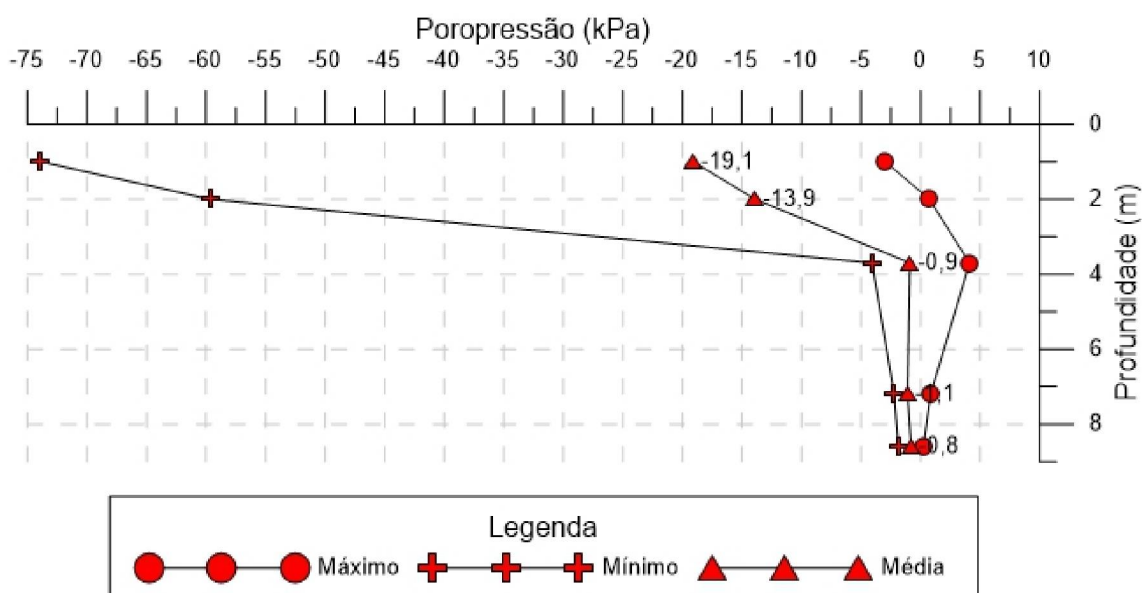


FONTE: O AUTOR (2018)

Acredita-se que a intensificação do processo de evaporação, associado as chuvas incidentes na região em épocas de verão geram os perfis típicos de poropressão ilustrados na FIGURA 62. Observa-se as maiores amplitudes e variabilidade nesta estação do ano nos equipamentos contidos na região vadosa. No primeiro metro registram-se uma média de -19,1 kPa. No segundo

metro a média é calculada na intensidade de -13,9 kPa. O PZE-04 instalado a 3,7 metros registra uma média de -0,9 kPa. Nas leituras dos piezômetros PZE-05 e PZE-06 registra-se uma variação entre as leituras muito baixa, com médias respectivamente de -1,1 kPa e -0,8 kPa.

FIGURA 62 - VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIAS REGISTRADOS DURANTE O VERÃO NA ILHA 01



FONTE: O AUTOR (2018)

Em resumo, observa-se na ilha 01 um comportamento similar ao das caracterizações realizadas nas ilhas 02 e 03. Invernos e Outonos com pequena amplitude entre as leituras máximas e mínimas na região vadosa. Com a chegada da primavera e verão intensifica-se a amplitude das leituras e a variabilidade das leituras. Como já dito, possivelmente o efeito de uma maior intensidade solar, no que tange a intensidade do fenômeno de evapotranspiração associado aos regimes de chuva são fatores predisponentes para as situações observadas nas análises desta seção.

5.4 INFLUÊNCIA DAS CHUVAS ANTECEDENTES NAS RESPOSTAS PIEZOMÉTRICAS

Nesta seção, são realizadas as análises conforme o proposto em 4.1.8. Como mencionado, são analisados eventos em que haja a ocorrência de chuvas

muito fortes, teve como objetivo analisar as variações de poropressões ocorridas devido aos acumulados pluviométricos.

Inicialmente, realizou-se uma análise da série histórica associada as leituras da instrumentação para definir os eventos selecionados. Conforme o QUADRO 5, o estudo de González *et. al.* (2017) indica que os eventos muito fortes possuem intensidade superior a 45,60 mm acumulados em 24 horas. Buscou-se ao longo da série histórica eventos que contivessem esses acumulados. Não se considerou os registros antes de 2013. Pois como as análises desse estudo foram horárias em períodos anteriores a 2013 haviam registros das leituras 3 vezes ao dia. Os eventos pluviométricos que possuem acumulados superiores a 45 mm podem ser visualizados no QUADRO 6.

QUADRO 6 – EVENTOS DE CHUVAS COM INTENSIDADE CONSIDERADA MUITO FORTE

Data	Chuva (mm)	Data	Chuva (mm)
06/01/2013	52	26/11/2014	69
08/02/2013	66,8	08/01/2015	63,6
10/03/2013	76,6	03/02/2015	95
21/03/2013	50,4	13/02/2015	67,4
03/04/2013	155,2	05/03/2015	46,6
04/04/2013	85,8	29/03/2015	71
05/05/2013	51	27/09/2015	52,2
20/07/2013	78,4	22/10/2015	80,6
22/07/2013	65	02/11/2015	53
26/08/2013	45,8	04/11/2015	96
20/09/2013	60,6	08/11/2015	49,6
22/09/2013	84,4	03/12/2015	45,4
03/01/2014	76,4	25/03/2016	238,6
11/01/2014	121,4	13/04/2016	189,2
04/03/2014	49,4	25/10/2016	123
27/06/2014	45,6	26/10/2016	76,8
16/08/2014	55		

FONTE: O AUTOR (2018)

Com os dados do QUADRO 6 obteve-se ao longo da série histórica 33 eventos considerados muito fortes. Devido a extensão dos eventos com classificação de intensidade muito forte, não foi possível realizar a análise detalhada de todos os eventos pluviométricos com todas as classificações propostas por González *et. al.* (2017). Por conta disto foram avaliadas 15% das

chuvas registradas na QUADRO 6. Totalizando 5 eventos pluviométricos com intensidade muito fortes analisados nessa pesquisa.

Durante a apuração dos eventos buscou-se escolher ao menos um evento por ano para compreender toda a série histórica. Outro fator considerado na seleção foi o fato de abranger todos os intervalos de chuvas a partir de 45 mm não escolhendo apenas os maiores acumulados pluviométricos. Desta forma, o QUADRO 7 apresenta os eventos escolhidos nas análises neste presente trabalho.

QUADRO 7 – ESCOLHA DOS EVENTOS DE CHUVAS COM INTENSIDADE MUITO FORTE PARA SEREM UTILIZADOS NAS ANÁLISES

Data	Chuva (mm)
08/02/2013	66,8
16/08/2014	55
03/02/2015	95
25/03/2016	238,6
13/04/2016	189,2

FONTE: O AUTOR (2018)

Escolhidas as chuvas com intensidades muito fortes a serem analisadas, foi possível agrupá-las em eventos. Devido à disposição delas foi possível selecionar 4 eventos para compreender o mecanismo de infiltração de forma detalhada. Desta forma, os eventos escolhidos compreendem seu período de duração descrito conforme o QUADRO 8, onde observam-se o contexto dos eventos selecionados no que condiz a períodos secos e chuvosos.

QUADRO 8 – RESUMO DOS EVENTOS UTILIZADOS NAS ANÁLISES

Evento	Descrição	Início	Término	Chuva (mm)
1	Período seco 1	23/01/2013	01/02/2013	8,4
	Período chuvoso 1	02/02/2013	15/02/2013	180,4
2	Período seco 2	26/07/2014	11/08/2014	18,8
	Período chuvoso 2	12/08/2014	16/08/2014	87
3	Período seco 3	22/01/2015	28/01/2015	5,4
	Período chuvoso 3	29/01/2015	04/02/2015	167
4	Período seco 4	16/03/2016	24/03/2016	15,2
	Período chuvoso 4	25/03/2016	15/04/2016	567,4

FONTE: O AUTOR (2018)

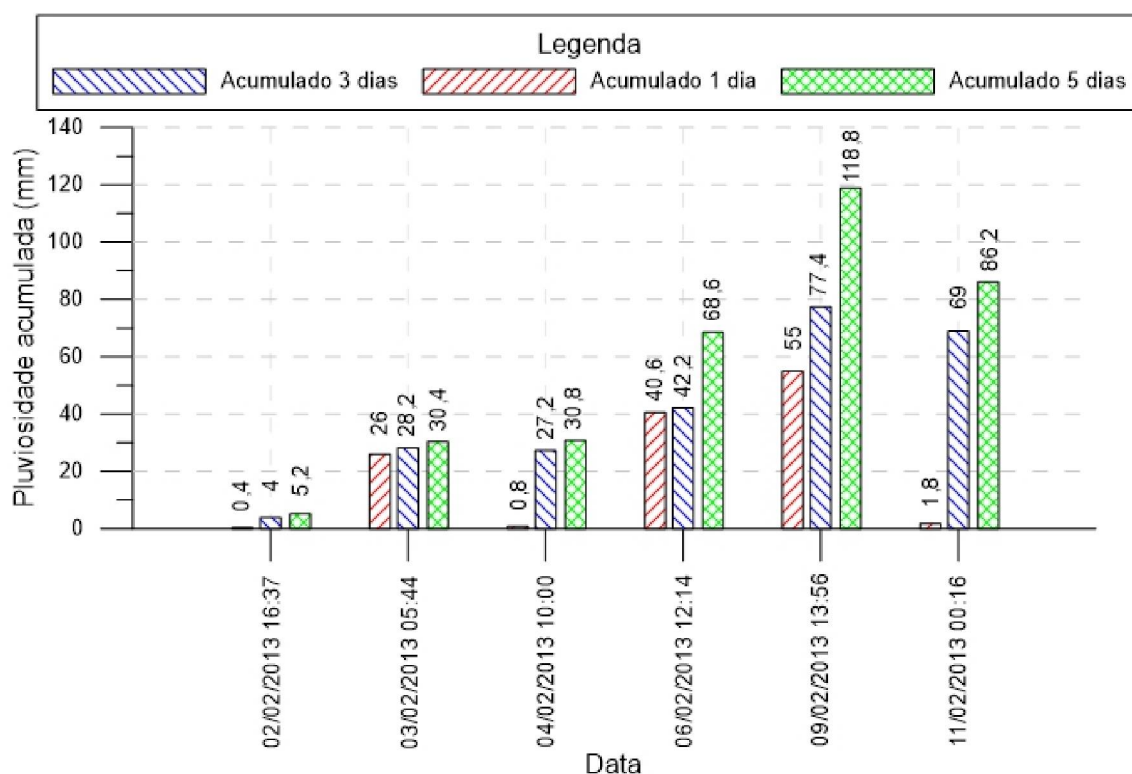
Logo após foram realizadas as análises dos 4 eventos selecionados, onde através de relações de leituras com acumulados pluviométricos procurou-se em demonstrar as relações entre essas duas variáveis. A pesquisa realizada neste trabalho consistiu nas medições realizadas com os instrumentos posicionados na ilha 02. Esta ilha possui o maior número de instrumentos instalados e é o local onde efetivamente o pluviógrafo está instalado.

5.3.1 EVENTO 1

O Evento 1 ocorreu na transição entre o período seco 1 e o período chuvoso 1, conforme descrito no QUADRO 8. O Evento 1 compreenderá o período com o seu início no dia 01/02/2013 e término no dia 13/02/2013.

No dia 03/02/2013 às 05:44 registrou-se um acumulado pluviométrico de 26 mm em 24 horas (FIGURA 64). Dos 26 mm registrados em 24 horas anotou-se 23,4 mm em apenas uma hora. Como consequência os níveis de poropressões registrados mantiveram-se constantes (FIGURA 64). Isso sugere que grandes intensidades horárias em lapsos de tempos muito curtos podem produzir maior escoamento e menor infiltração.

FIGURA 63 – RESUMO DOS REGISTROS PLUVIOMÉTRICOS. DO EVENTO 1



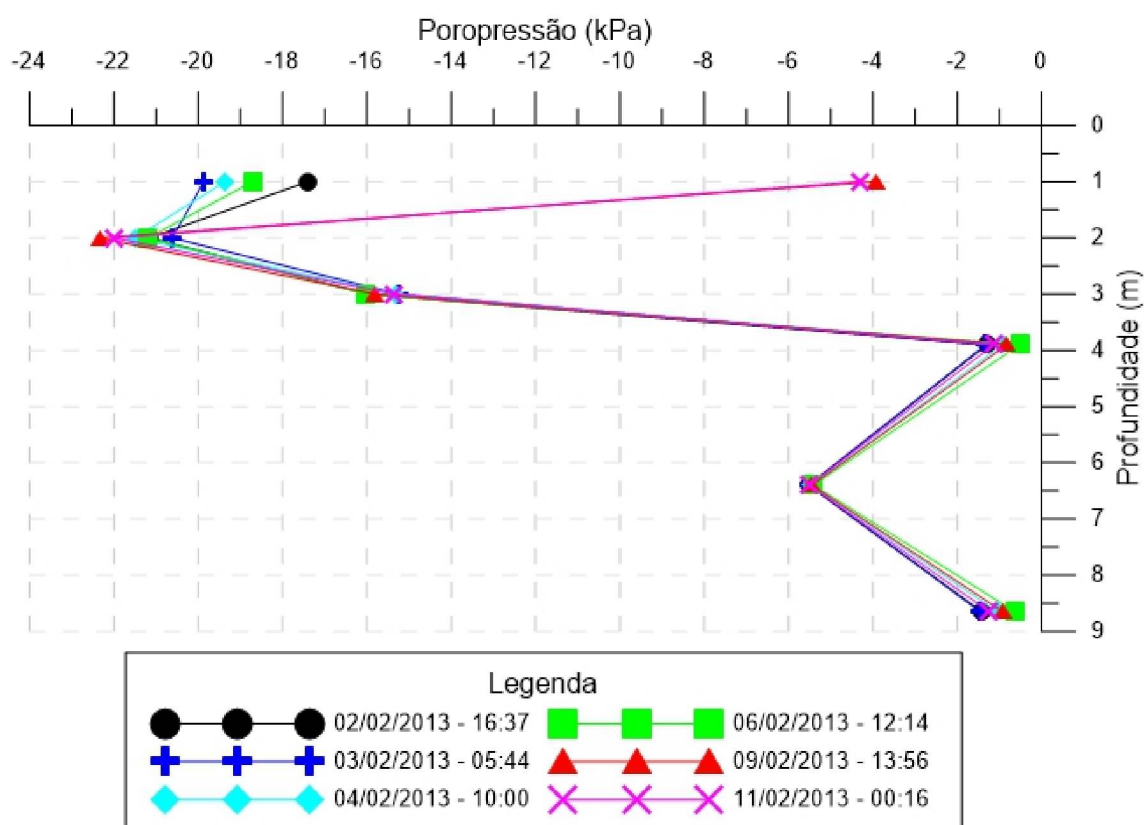
FONTE: O AUTOR (2018)

No dia 04/02/2013 às 10:00 observou-se leituras estáveis com tendência de redução gradual nos valores de poropressão (FIGURA 64). Este comportamento pode ser atribuído a influência da vegetação e a não ocorrência de um evento pluviométrico que viesse a infiltrar água no solo (0,8 mm acumulados em 24 horas - FIGURA 63).

No dia 06/02/2013 às 12:14 registrou-se um acumulado de 40,6 mm em 24 horas (FIGURA 63). Entretanto observou-se em apenas uma hora um acumulado de 28 mm, sugerindo que grandes intensidades horárias em tempos muito curtos de duração tendem a escoar ao invés de infiltrar. Desta forma os níveis de poropressão mantiveram-se estáveis (FIGURA 64).

No dia 09/02/2013 às 13:56, registrou-se uma variação de 80% nas leituras no primeiro metro, evidenciando a chegada da frente de umedecimento nesta profundidade. Provavelmente, o evento pluviométrico de 55 mm em 24 horas associado aos 118,8 mm acumulados em cinco dias (FIGURA 63), foram suficientes para fazer com que houvesse o aumento de umidade devido a percolação descendente da água até um metro de profundidade.

FIGURA 64 – PERFIS DE POROPRESSÃO GERADOS NO EVENTO 1



FONTE: O AUTOR (2018)

No dia 11/02/2013 às 00:16, com a não continuidade de um evento pluviométrico (1,8 mm em 24 horas) que viesse a infiltrar no solo, observou-se leituras estáveis com tendência de redução gradual nos valores de poropressão possivelmente atribuída à influência da vegetação. Cabe salientar que o tipo de solo é caracterizado como arenoso, sendo este um fator significativo. Justamente por permitir uma rápida drenagem do maciço, o acréscimo de poropressões é facilmente dissipado, sendo necessário a continuidade de eventos pluviométricos sucessivos em 24 horas para promover incrementos de poropressão.

Não foram percebidas variações significativas nas leituras nos aparelhos em profundidades superiores a dois metros. As leituras mantiveram-se estáveis devido a estabilidade nos níveis de umidade.

Para o cálculo da intensidade de chuva que levou o avanço da frente de umedecimento até um metro de profundidade no dia 09/02/2013 às 13:56 utilizou-se a EQUAÇÃO 11. Os parâmetros de entrada no método teórico foram

baseados nos dados da instrumentação. Estes dados estão definidos no QUADRO 9.

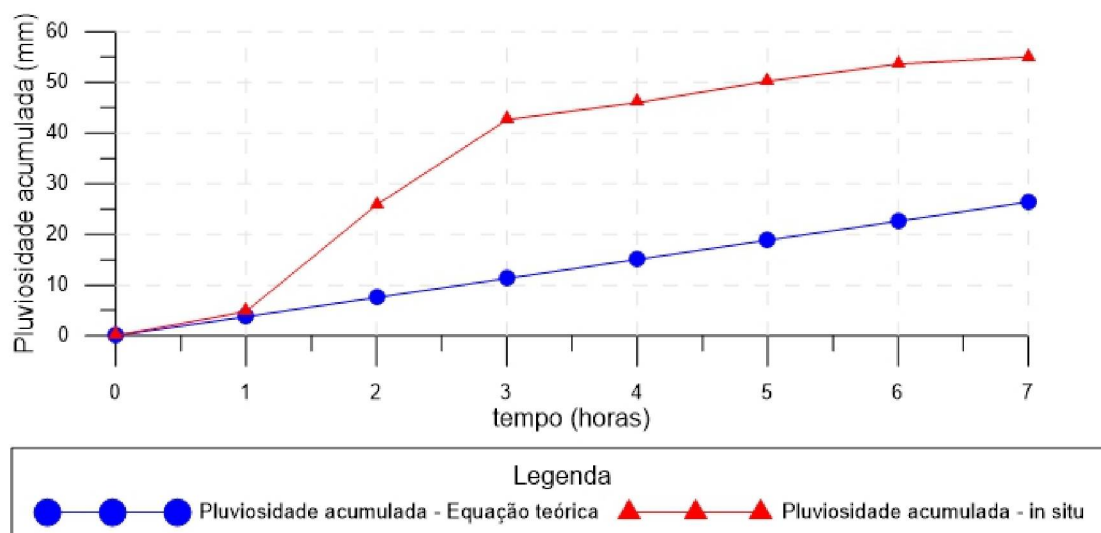
QUADRO 9 – PARÂMETROS UTILIZADOS NO CÁLCULO DA INTENSIDADE MÍNIMA PARA O DIA 09/02/2013

Umidade inicial	0,257 cm ³
Umidade Saturada	0,303 cm ³
Altura de sucção	180 cm
Tempo mínimo de ocorrência da chuva	7 horas
Profundidade da frente de umedecimento	100 cm

FONTE: O AUTOR (2018)

A partir dos dados do QUADRO 9 a intensidade média mínima (I_{min}) calculada pela EQUAÇÃO 11 para levar o avanço da frente de umedecimento até um metro foi de 3,76 mm/h totalizando ao longo de 7 horas um acumulado de 26,32 mm. Entretanto, nos dados obtidos em campo ao longo de 7 horas registrou-se uma intensidade média de chuva igual a 7,85 mm/h, totalizando 55 mm. A FIGURA 65 apresenta as curvas de pluviosidade acumulada ao longo de 7 horas para os dados verificados pela equação teórica e os obtidos em campo. Observa-se que a intensidade da chuva em campo foi superior a mínima para levar o avanço da frente de umedecimento até um metro, estando em conformidade com a equação teórica.

FIGURA 65 – CURVAS COMPARATIVAS ENTRE EQUAÇÃO TEÓRICA E DADOS DE CAMPO



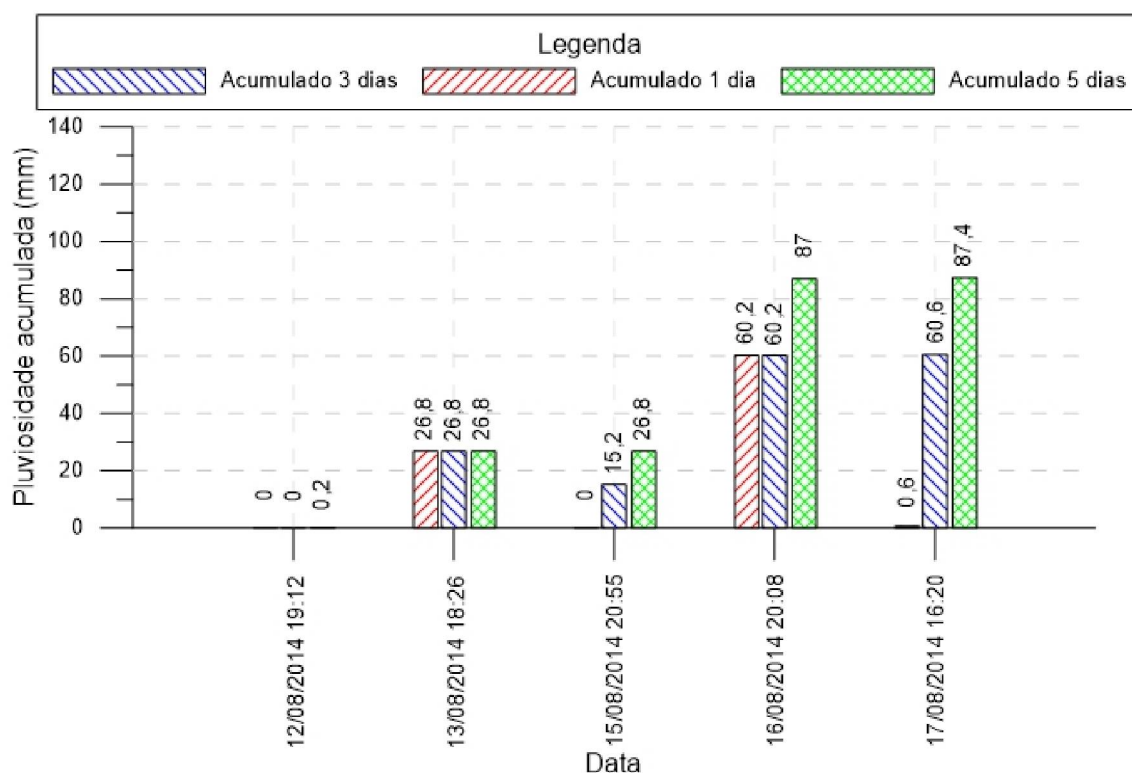
FONTE: O AUTOR (2018)

5.3.2 EVENTO 2

O evento 2 compreendeu o período de transição entre o período seco 2 e o período chuvoso 2, estes descritos na **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Desta forma, o Evento 2 inicia-se no dia 11/08/2014 e termina no dia 17/08/2014.

No dia 13/08/2014 às 18:26, registrou-se em 24 horas um acumulado de 26,8 mm que manteve constante as leituras de poropressão. Acredita-se que devido aos baixos índices pluviométricos nos últimos cinco dias (26,8 mm - FIGURA 66) essa pluviosidade em 24 horas não foi suficiente para penetrar no solo e aumentar a umidade no instrumento a um metro.

FIGURA 66 - RESUMO DOS REGISTROS PLUVIOMÉTRICOS. DO EVENTO 2



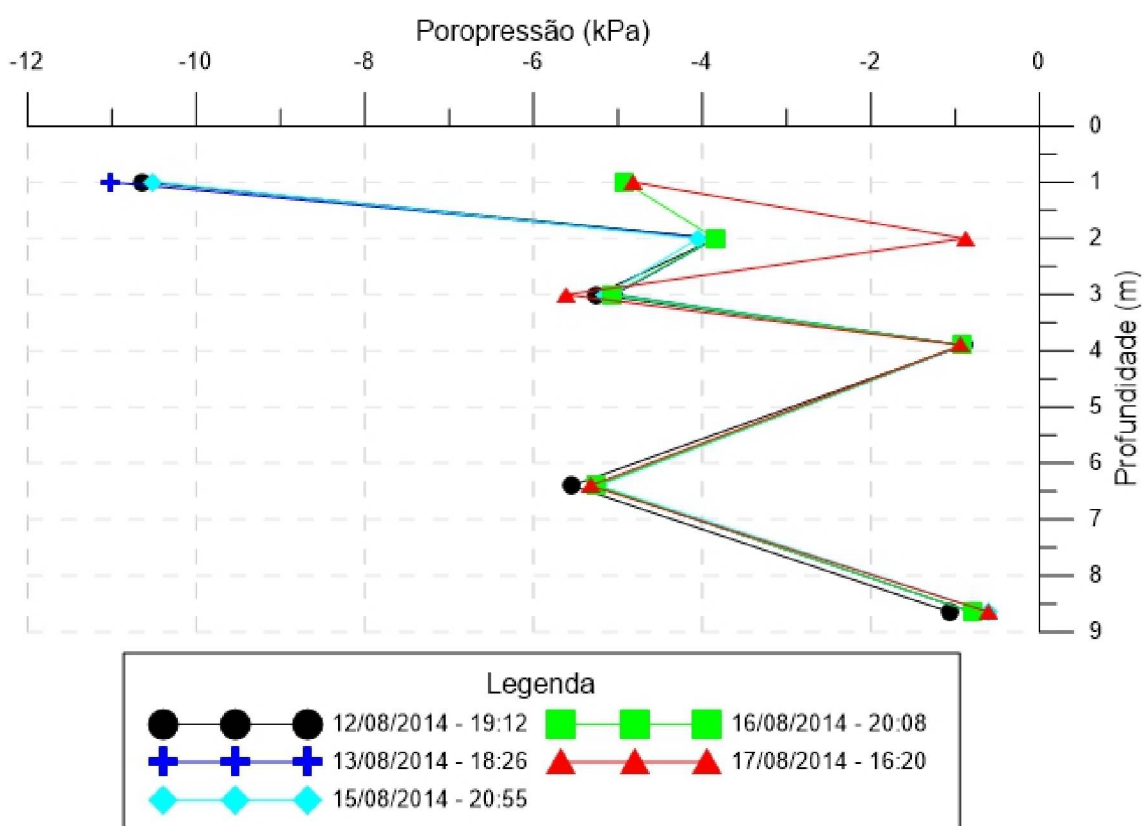
FONTE: O AUTOR (2018)

No dia 15/08/2014 às 08:55, observaram-se leituras estáveis com tendência de redução gradual nos valores de poropressão (FIGURA 67). Este comportamento pode ser atribuído a influência da vegetação e a não ocorrência

de um evento pluviométrico que viesse a infiltrar no solo (0,0 mm acumulados em 24 horas - FIGURA 66).

No dia 16/08/2014 às 20:08 o registro pluviométrico de 60,2 mm em 24 horas (FIGURA 66), possui como característica baixas intensidades horárias divididas em períodos longos (24 horas), fazendo com que prevaleça a infiltração ao invés do escoamento. Como consequência disto observa-se a chegada da frente de umedecimento a um metro de profundidade quando se registra uma variação de 50% nesta leitura. A característica granulométrica arenosa facilita a rápida infiltração e drenagem através do solo. No dia 17/08 às 16:20, observa-se que a água continua se movendo através do solo, mesmo sem a ocorrência de nenhum evento pluviométrico significativo em 24 horas (0,6 mm - FIGURA 66), e acaba por alcançar a profundidade de dois metros de profundidade no dia 17/08 às 04:20 quando registra-se um acréscimo de 75% nas leituras nesta profundidade (FIGURA 67).

FIGURA 67 - PERFIS DE POROPRESSÃO GERADOS NO EVENTO 2



FONTE: O AUTOR (2018)

Assim como nos outros eventos, não são percebidas variações significativas nas leituras nos aparelhos em profundidades superiores a dois metros, corroborando o entendimento de que esses eventos não sofrem alterações devido aos eventos pluviométricos analisados neste evento.

Para o cálculo da intensidade de chuva que levou o avanço da frente de umedecimento até dois metros de profundidade no dia 17/08/2014 às 16:20 utilizou-se a EQUAÇÃO 11. Os parâmetros de entrada utilizados neste método teórico, foram obtidos com base nos dados da instrumentação. Estes estão definidos no QUADRO 10.

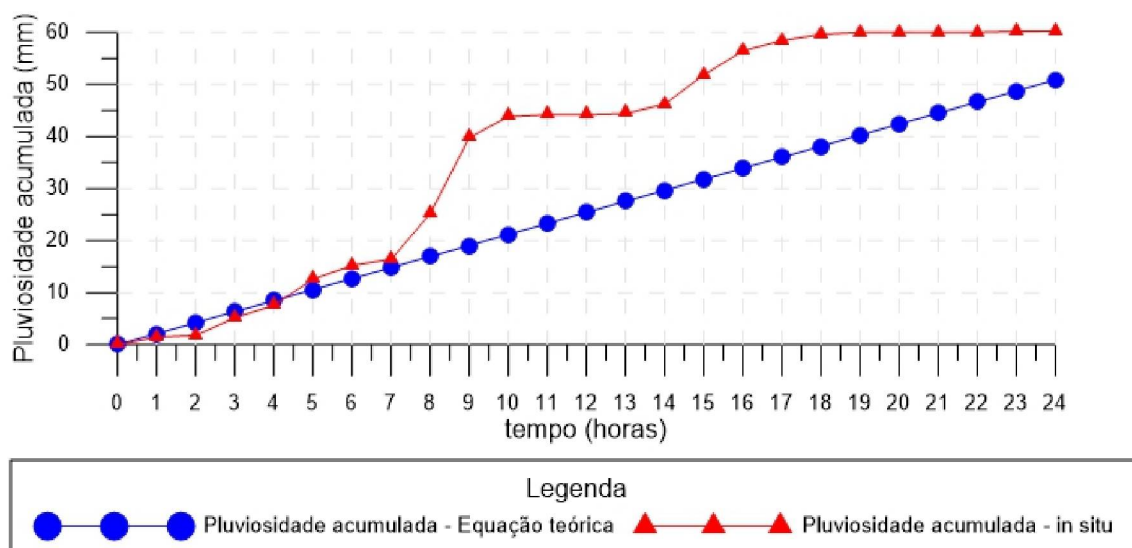
QUADRO 10– PARÂMETROS UTILIZADOS NO CÁLCULO DA INTENSIDADE MÍNIMA PARA O DIA 17/08/2014

Umidade inicial	0,27 cm ³
Umidade Saturada	0,303 cm ³
Altura de sucção	40 cm
Tempo mínimo de ocorrência da chuva	24 horas
Profundidade da frente de umedecimento	200 cm

FONTE: O AUTOR (2018)

A partir dos dados do QUADRO 10 a intensidade média mínima (I_{min}) calculada pela EQUAÇÃO 11 para levar o avanço da frente de umedecimento até dois metros foram de 2,11 mm/h totalizando ao longo de 24 horas um acumulado de 50,64 mm. Entretanto, nos dados obtidos em campo ao longo de 24 horas registrou-se uma intensidade média de chuva igual a 2,50 mm/h, totalizando 60 mm. A FIGURA 68 apresenta as retas de pluviosidade acumulada a partir das intensidades médias ao longo de 24 horas para os dados verificados pela equação teórica e os obtidos em campo. Observa-se que a intensidade da chuva em campo foi superior a mínima para levar o avanço da frente de umedecimento até 2,0 metros, estando em conformidade com a equação teórica.

FIGURA 68 – CURVAS COMPARATIVAS ENTRE EQUAÇÃO TEÓRICA E DADOS DE CAMPO



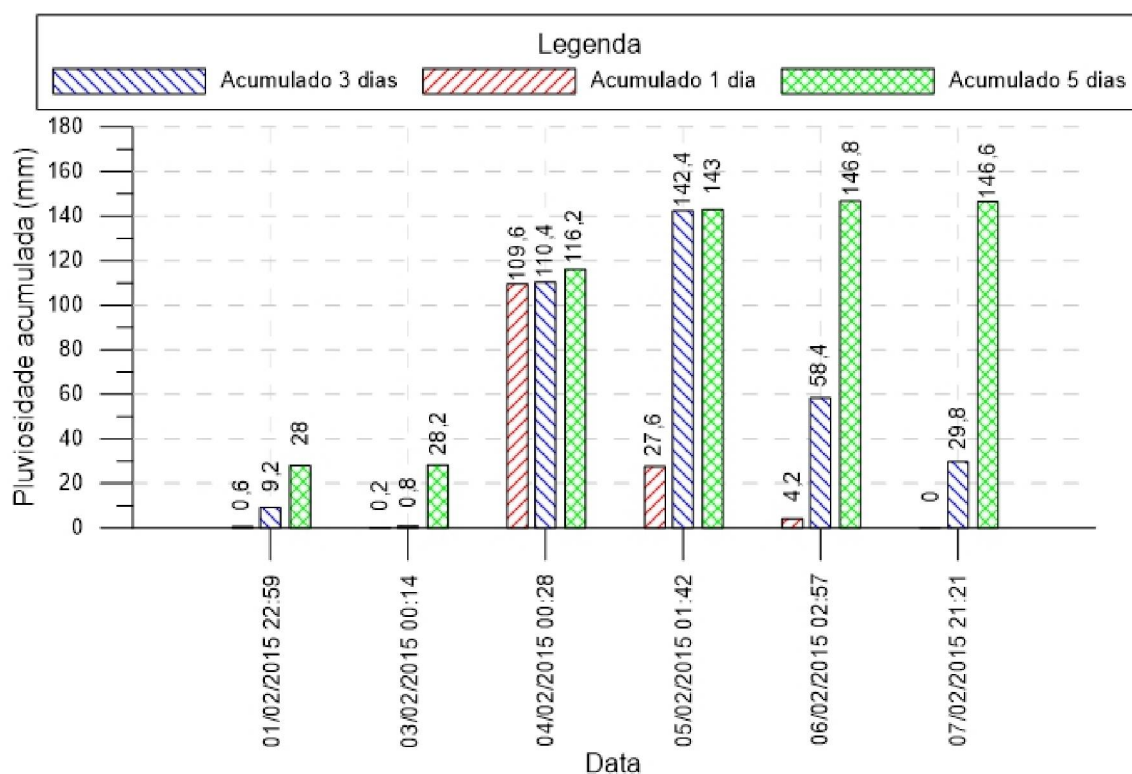
FONTE: O AUTOR (2018)

5.3.3 EVENTO 3

O Evento 3 compreendeu conforme a QUADRO 8, o período de transição entre o período seco 3 e o período chuvoso 3. Sendo assim, o Evento 3 começou no dia 31/01/2015 e teve o fim das suas análises no dia 07/02/2015

Nos dias 01/02/2015 e 03/02/2015 observam-se as leituras estáveis com tendência de redução nos valores de poropressão devido a ação da vegetação e a não ocorrência de eventos pluviométricos que pudesse infiltrar água no solo.

FIGURA 69 - RESUMO DOS REGISTROS PLUVIOMÉTRICOS DO EVENTO 3



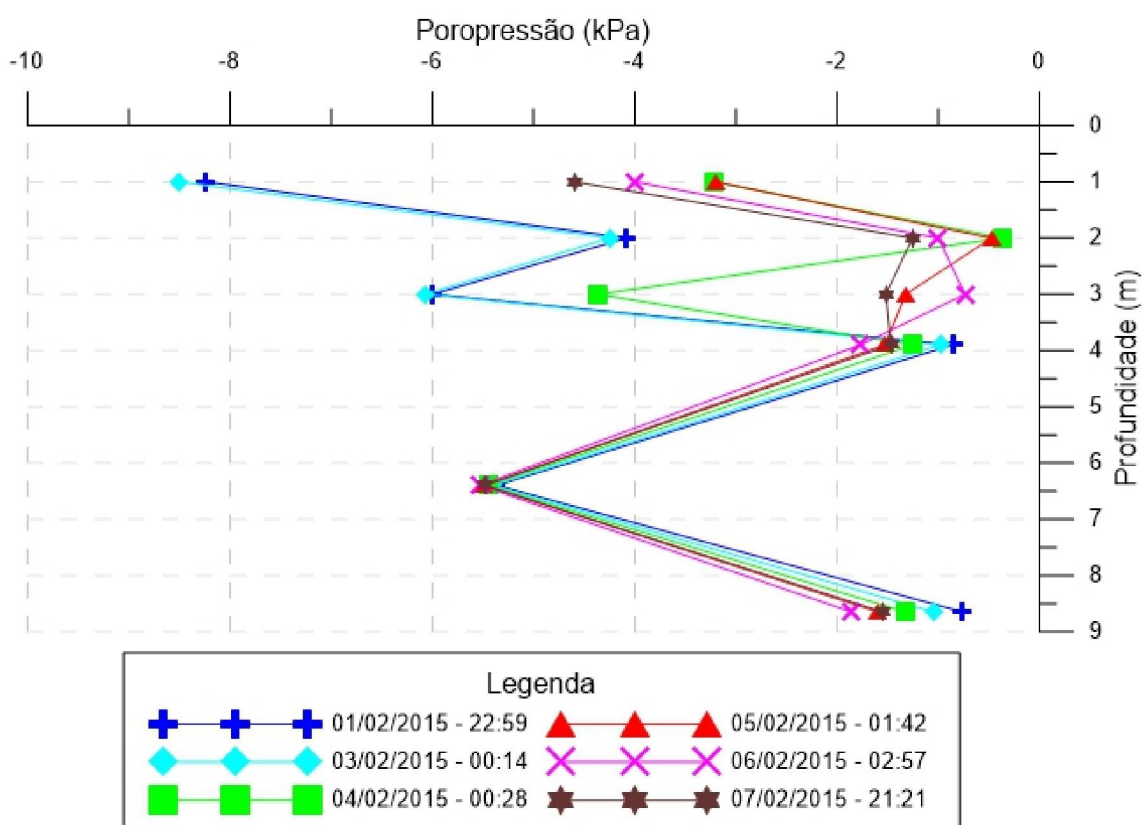
FONTE: O AUTOR (2018)

O registro pluviométrico de 109,6 mm acumulado ao longo de 24 horas (FIGURA 69) no dia 04/02/2015 às 00:28 promoveu imediatas alterações nas poropressões até a profundidade de três metros (FIGURA 70). Por estar contido em um perfil arenoso que pode ser muito permeável, o aumento de umidade devido a infiltração das águas pluviais permite respostas no mesmo dia do evento. Em relação ao dia anterior registra-se uma variação de 62% no primeiro metro, 91% no segundo metro e 30% no terceiro metro. Isto evidencia a chegada da frente de umedecimento até a profundidade de três metros

Com a continuidade do evento pluviométrico no dia 05/02/2015 registra-se às 01:42 um acumulado em 24 horas igual a 27,6 mm. Entretanto em apenas uma hora anotou-se um acumulado de 19 mm, fazendo com que haja uma estabilização das leituras nos primeiros dois metros (FIGURA 70). Provavelmente, devido à alta intensidade em um baixo período de tempo prevaleceu o escoamento ao invés da infiltração. Por outro lado, percebe-se na FIGURA 70, o incremento das leituras de poropressão a três metros de profundidade. Acredita-se que nessa profundidade o acréscimo de umidade é

devido à ocorrência do evento pluviométrico de 109,6 mm no dia 04/02/2015 (FIGURA 69). Tal fato demonstra que o processo de infiltração em maiores profundidades pode continuar dias após a ocorrência de um evento pluviométrico.

FIGURA 70 - PERFIS DE POROPRESSÃO GERADOS NO EVENTO 3



FONTE: O AUTOR (2018)

No dia 06/02/2015, com um registro de 4,2 mm em 24 horas (FIGURA 69) nota-se a gradual diminuição dos valores de poropressão nos dois primeiros metros (FIGURA 70). Este comportamento pode ser atribuído a não continuidade de eventos pluviométricos significativos e a ação da vegetação. Entretanto, aos três metros de profundidade, percebe-se o aumento das leituras de poropressão (FIGURA 70). Provavelmente os instrumentos em maiores profundidades possuem um tempo de resposta maior, podendo o processo de infiltração gerar o aumento da umidade ao longo de dias após o término de eventos de chuva.

A partir do dia 07/02/2015 não há o registro de nenhum evento pluviométrico em 24 horas (FIGURA 69). A vegetação a partir do processo de

evapotranspiração, retira a água do solo e percebe-se a continua redução dos valores de poropressão. Desta vez, reduzindo os valores de poropressão na profundidade de três metros (FIGURA 70). Consequentemente, percebeu-se que houve a dissipação do excesso de poropressão e a umidade começa a reduzir gradualmente.

Não foram percebidas variações significativas nas leituras nos aparelhos em profundidades superiores a três metros. As leituras mantiveram-se estáveis devido a estabilidade nos níveis de umidade.

Para o cálculo da intensidade de chuva que levou o avanço da frente de umedecimento até três metros de profundidade no dia 04/02/2015 às 00:28 utilizou-se a EQUAÇÃO 11. Os parâmetros de entrada, baseados na instrumentação foram definidos no QUADRO 11.

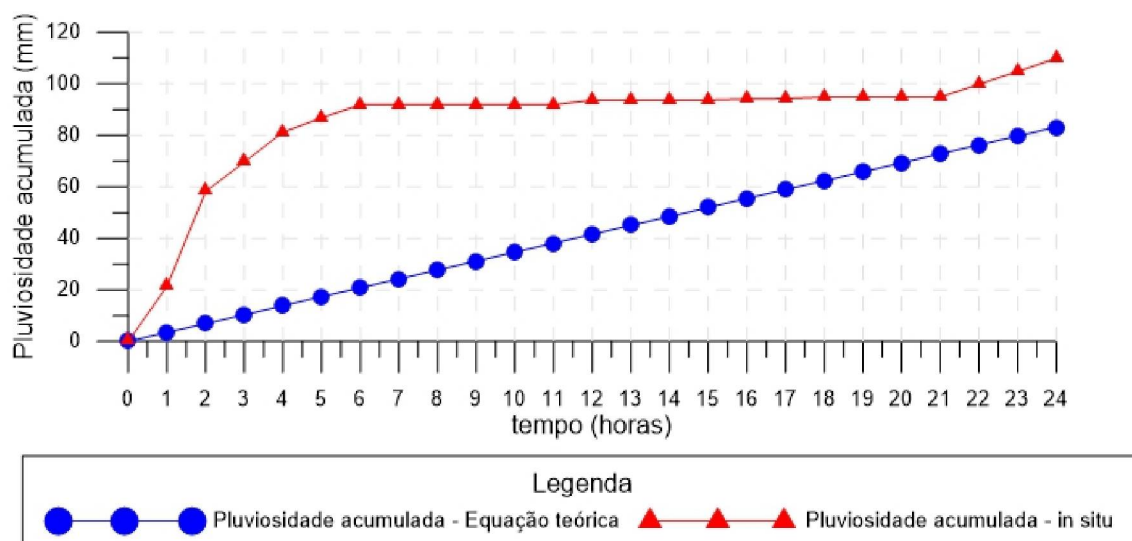
QUADRO 11– PARÂMETROS UTILIZADOS NO CÁLCULO DA INTENSIDADE MÍNIMA PARA O DIA 04/02/2015

Umidade inicial	0,267 cm ³
Umidade Saturada	0,303 cm ³
Altura de sucção	60 cm
Tempo mínimo de ocorrência da chuva	24 horas
Profundidade da frente de umedecimento	300 cm

FONTE: O AUTOR (2018)

A partir dos dados do QUADRO 11, a intensidade média mínima (I_{min}) calculada pela EQUAÇÃO 11 para levar o avanço da frente de umedecimento até três metros foram de 3,46 mm/h, totalizando, ao longo de 24 horas, um acumulado de 83,15 mm. Entretanto, nos dados obtidos em campo, ao longo de 24 horas, registrou-se uma intensidade média de chuva igual a 4,56 mm/h, totalizando 109,6 mm. A FIGURA 71 apresenta as curvas de pluviosidade acumulada ao longo de 24 horas para os dados verificados pela equação teórica e os obtidos em campo. Observa-se que a intensidade da chuva em campo foi superior a mínima para levar o avanço da frente de umedecimento até 3,0 metros, estando em conformidade com a equação teórica.

FIGURA 71 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE EQUAÇÃO TEÓRICA E DADOS DE CAMPO



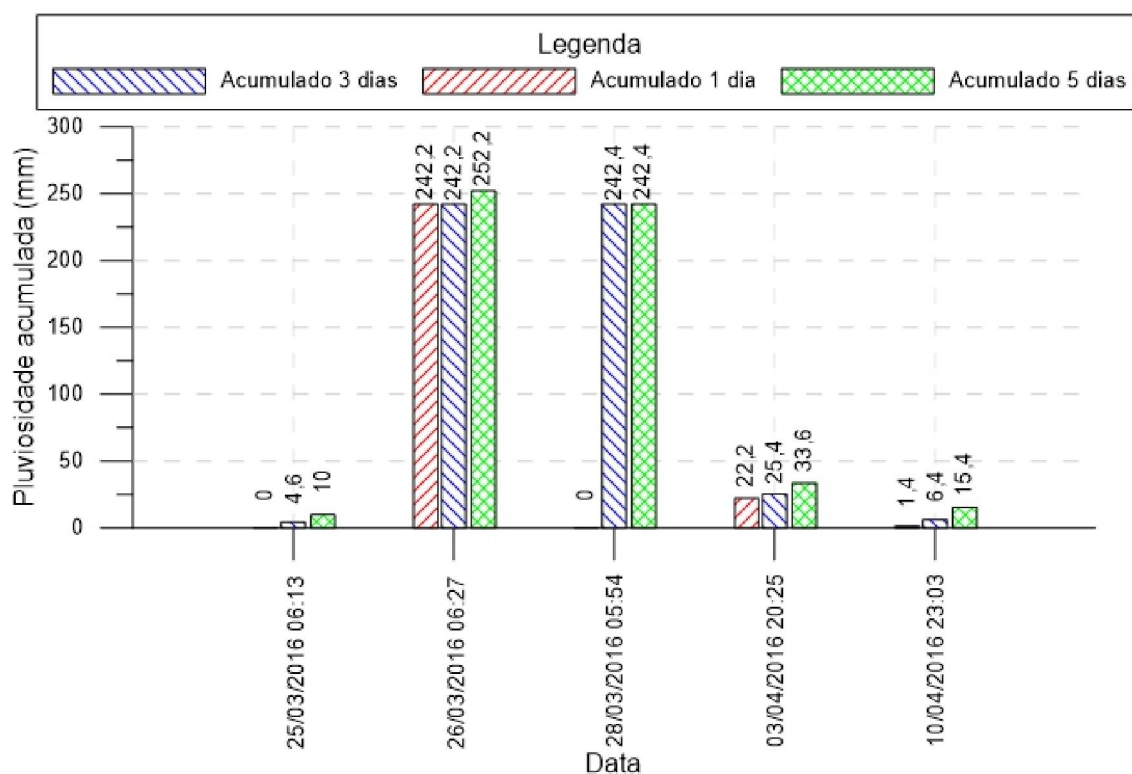
FONTE: O AUTOR (2018)

5.3.4 EVENTO 4

O evento 4 foi compreendido entre o período seco 5 e o período chuvoso 4, demonstrados na **Erro! Fonte de referência não encontrada..** O Evento 4 tem como início o dia 24/03/2016 e as análises deste ocorreram até o dia 24/04/2016.

O acumulado pluviométrico em 24 horas de 242 mm (FIGURA 72) tem como característica uma intensidade média de 10,52 mm distribuído ao longo de 23 horas. A provável alta taxa de infiltração e permeabilidade da rocha alterada assim como a característica granulométrica arenosa do solo facilitam a rápida infiltração e drenagem através do sistema de fraturas do maciço rochoso levando o avanço da frente de umedecimento até a profundidade de 6,4 metros como se observa na FIGURA 73. Notou-se, também, a elevação do lençol freático com o consequente registro de poropressão positiva no instrumento instalado a 8,65 metros. Ao compararmos o perfil de poropressões (FIGURA 73) no dia 25/03/2016 às 06:13 com o do dia 26/03/2016 às 06:27 é possível observarr que a pluviosidade de 242,2 mm ao longo de 24 horas (FIGURA 72) causou variações em todos instrumentos.

FIGURA 72 - RESUMO DOS REGISTROS PLUVIOMÉTRICOS. DO EVENTO 4

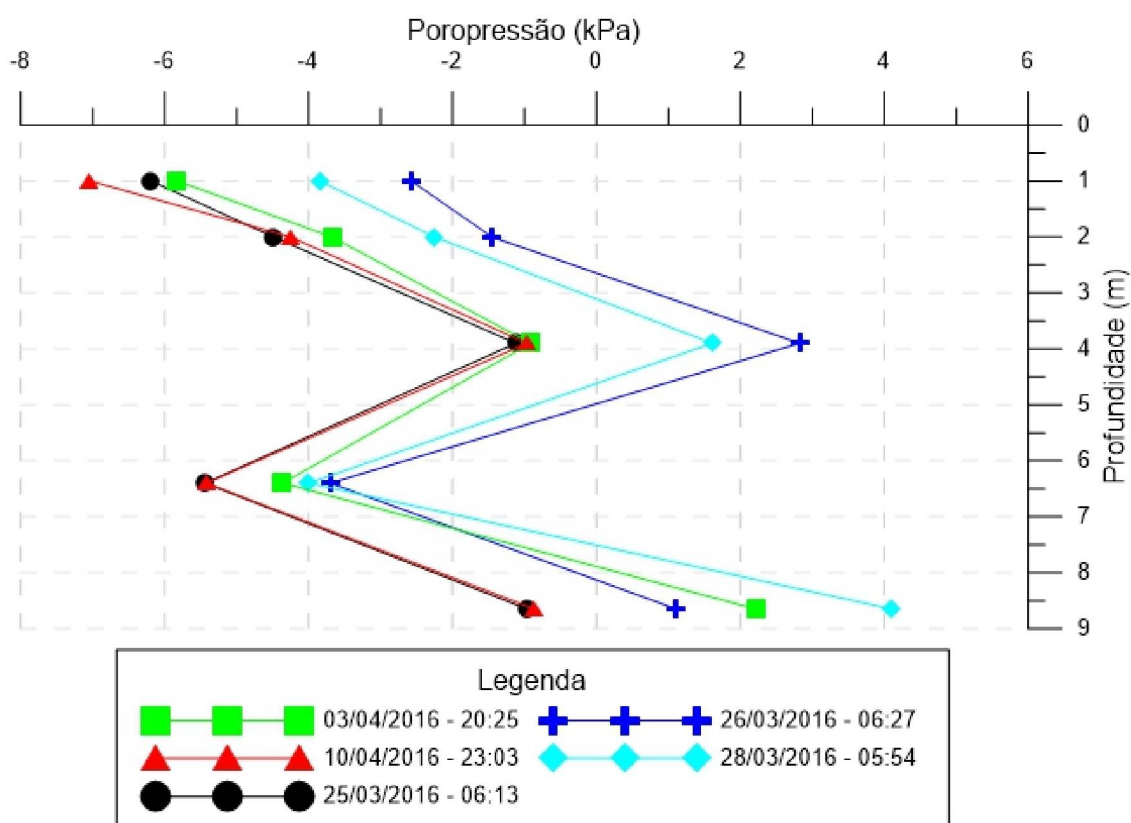


FONTE: O AUTOR (2018)

No dia 28/03/2016 às 05:54 com a não continuidade de um evento pluviométrico em 24 horas (0 mm - FIGURA 72) observou-se a estabilização das leituras com redução gradual das poropressões no primeiros 6,4 metros (FIGURA 73). Observa-se na FIGURA 73 que o lençol freático continua a ascender com o acréscimo nas leituras de poropressão.

No dia 03/04/2016 às 20:25 registra-se um acumulado de 22,2 mm em 24 horas (FIGURA 72). Sendo que este acumulado apesar de registrado nas últimas 24 horas ocorreu em apenas uma hora, como consequência provocou a continua redução gradual nos níveis de poropressões (FIGURA 73). Isso indica que grandes intensidades horárias em intervalos de tempos muito curtos podem produzir maior escoamento e menor infiltração. Neste mesmo dia, ainda se observa a redução gradual nas leituras de poropressão a 8,65 metros demonstrando uma redução no lençol freático.

FIGURA 73 - PERFIS DE POROPRESSÃO GERADOS NO EVENTO 4

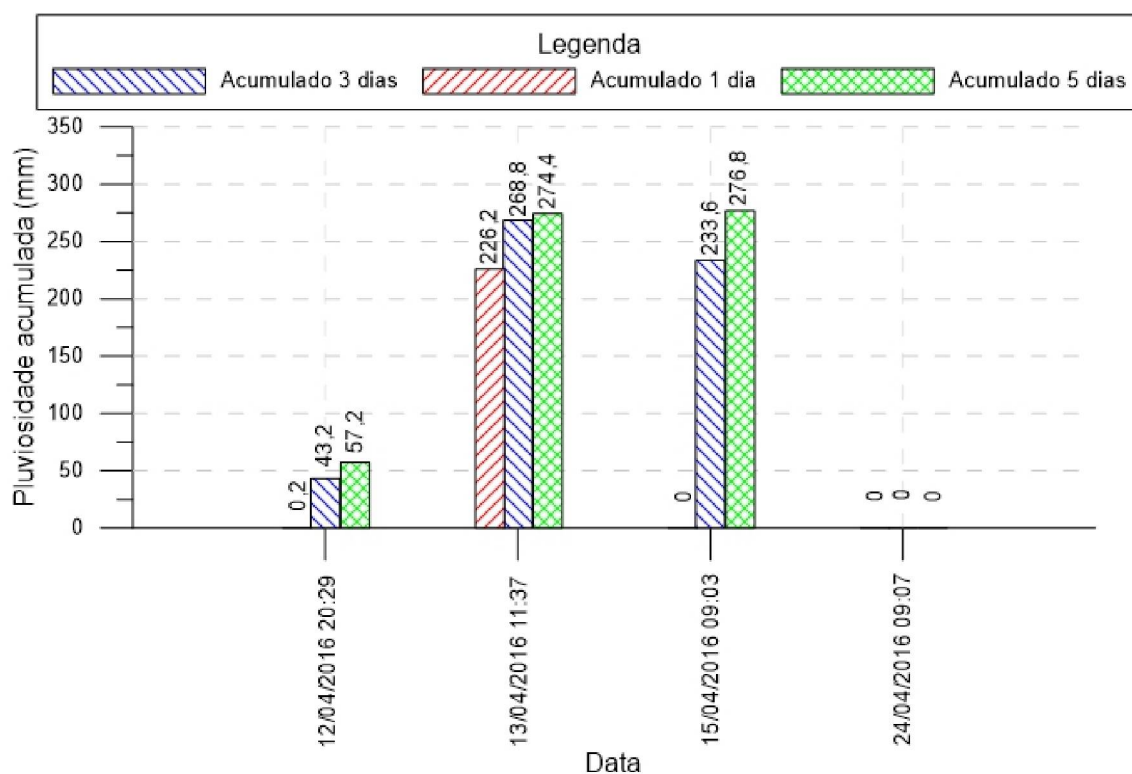


FONTE: O AUTOR (2018)

No dia 10/04/2016 às 23:03, 15 dias após a ocorrência do evento pluviométrico de 242,2 mm no dia 26/03/2016 às 06:27 (FIGURA 72) observou-se a recuperação das poropressões aos níveis do dia 25/03 às 06:13 (FIGURA 73).

Similar ao dia 26/03/2016 registrou-se no dia 13/04/2016 às 11:37 um acumulado pluviométrico em 24 igual a 226,2 mm (FIGURA 74). Através da FIGURA 75 observa-se o avanço da frente de umedecimento até a profundidade de 6,4 metros e a elevação do lençol freático com o registro de poropressões positivas pelo instrumento instalado a 8,65 metros. Acredita-se que a rápida infiltração da água através do solo é consequente da provável granulometria arenosa associada a possível alta taxa de infiltração e permeabilidade da rocha alterada facilitando a percolação em camadas mais profundas através do sistema de fraturas do maciço causando a consequente elevação do lençol freático.

FIGURA 74 - RESUMO DOS REGISTROS PLUVIOMÉTRICOS. DO EVENTO 4

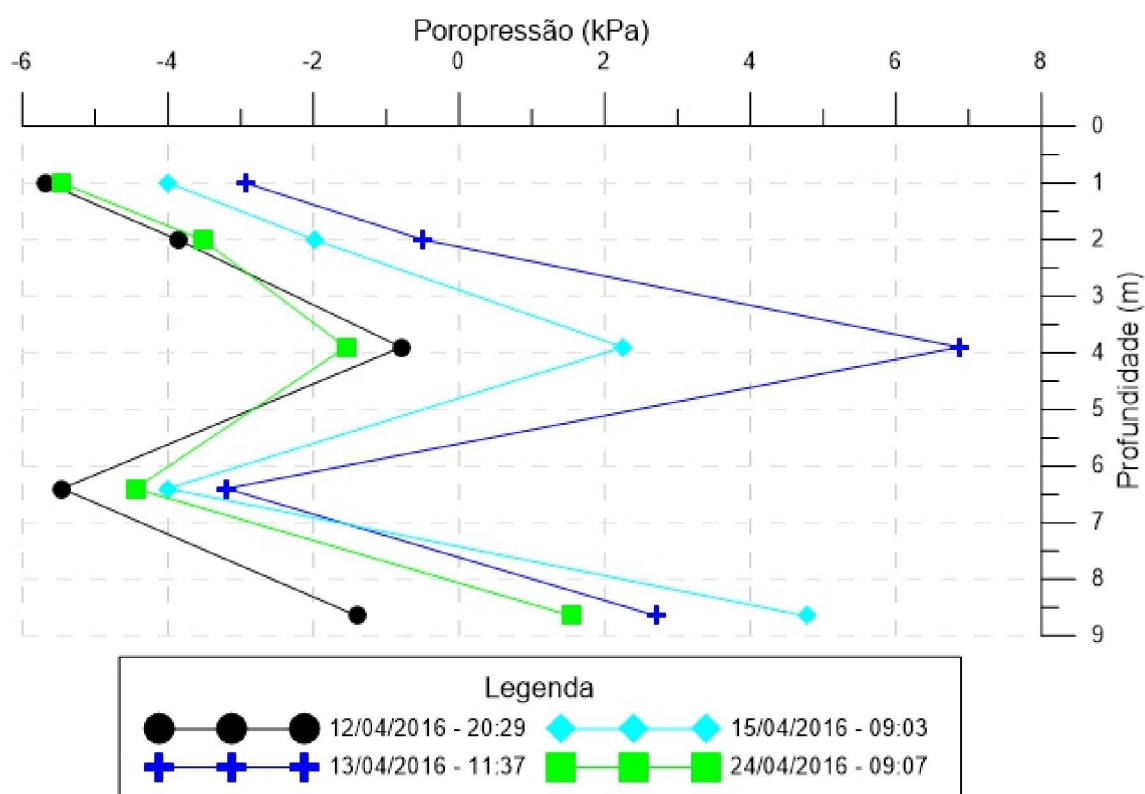


FONTE: O AUTOR (2018)

No dia 15/04/2016 às 09:03 com a não continuidade de um evento pluviométrico em 24 horas (0 mm - FIGURA 74) a o decréscimo da umidade no perfil de poropressões e consequente redução desses valores até a profundidade de 6,4 metros. Aos 8,65 metros registrou-se o aumento das leituras de poropressões demonstrando a complexidade dos processos de infiltração nas camadas mais profundas, onde as leituras são alteradas dias após o fim de términos de eventos pluviométricos.

No dia 24/04/2016 às 09:07 observou-se os perfis de poropressões nos primeiros 6,4 metros similares aos do dia 12/04/2016. Isso demonstra a recuperação dos valores de poropressão 12 dias após o evento pluviométrico do dia 13/04. Nos dias subsequentes as leituras a 8,65 metros continuam reduzir, retornando aos níveis parecidos do dia 12/04/2016.

FIGURA 75 - PERFIS DE POROPRESSÃO GERADOS NO EVENTO 4



FONTE: O AUTOR (2018)

Para o cálculo da intensidade de chuva que levou o avanço da frente de umedecimento até 6,4 metros de profundidade no dia 26/03/2016 às 06:27 utilizou-se a EQUAÇÃO 11. Os parâmetros de entrada, baseados na instrumentação foram definidos no QUADRO 12.

QUADRO 12 - PARÂMETROS UTILIZADOS NO CÁLCULO DA INTENSIDADE MÍNIMA PARA O DIA 26/03/2016

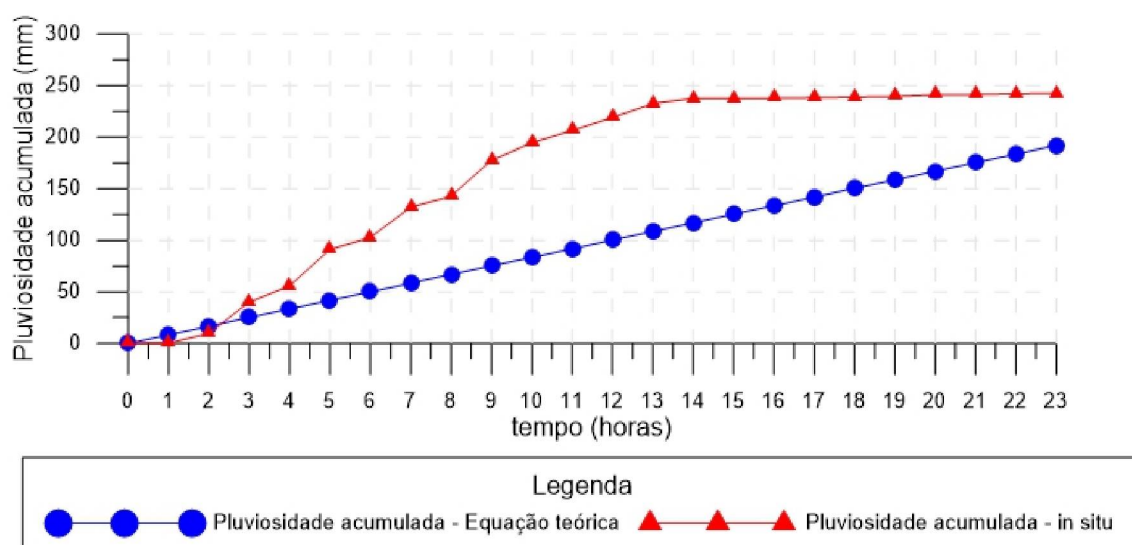
Umidade inicial	0,268 cm ³
Umidade Saturada	0,303 cm ³
Altura de sucção	50 cm
Tempo mínimo de ocorrência da chuva	23 horas
Profundidade da frente de umedecimento	640 cm

FONTE: O AUTOR (2018)

A partir dos dados do QUADRO 12 a intensidade média mínima (I_{min}) calculada pela EQUAÇÃO 11 para levar o avanço da frente de umedecimento até 6,4 metros foi de 8,34 mm/h totalizando ao longo de 23 horas um acumulado de 191,82 mm. Entretanto, nos dados obtidos em campo ao longo de 23 horas

são de uma intensidade média de chuva igual a 10,57 mm/h, totalizando 243,2 mm. A FIGURA 76 apresenta as curvas de pluviosidade acumulada ao longo de 24 horas para os dados verificados pela equação teórica e os obtidos em campo. Observa-se que a intensidade da chuva em campo foi superior a mínima para levar o avanço da frente de umedecimento até 6,40 metros, estando em conformidade com a equação teórica.

FIGURA 76 - GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE EQUAÇÃO TEÓRICA E DADOS DE CAMPO



FONTE: O AUTOR (2018)

Para o cálculo da intensidade de chuva que levou o avanço da frente de umedecimento até três metros de profundidade no dia 13/04/2016 às 11:37 utilizou-se a EQUAÇÃO 11. Os parâmetros de entrada, baseados na instrumentação foram definidos no QUADRO 13.

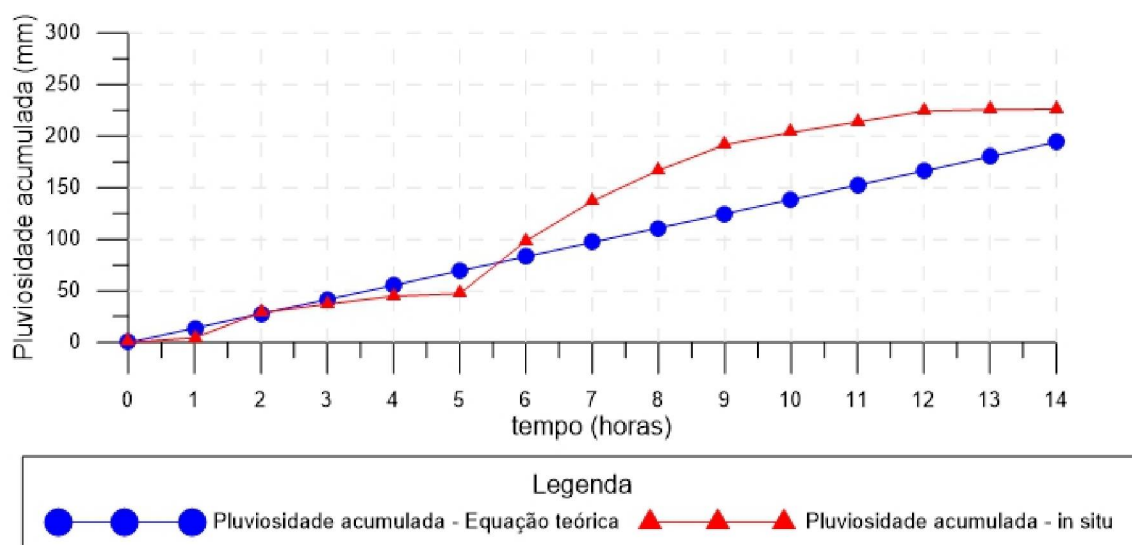
QUADRO 13 - PARÂMETROS UTILIZADOS NO CÁLCULO DA INTENSIDADE MÍNIMA PARA O DIA 13/04/2016

Umidade inicial	0,267 cm ³
Umidade Saturada	0,303 cm ³
Altura de sucção	60 cm
Tempo mínimo de ocorrência da chuva	14 horas
Profundidade da frente de umedecimento	640 cm

FONTE: O AUTOR (2018)

A partir dos dados do QUADRO 13 a intensidade média mínima (I_{min}) calculada pela EQUAÇÃO 11 para levar o avanço da frente de umedecimento até 6,4 metros foram de 13,85 mm/h totalizando ao longo de 14 horas um acumulado de 193,95 mm. Entretanto, nos dados obtidos em campo ao longo de 14 horas registrou-se uma intensidade média de chuva igual a 16,15 mm/h, totalizando 226,2 mm. A FIGURA 77 apresenta as curvas de pluviosidade acumulada ao longo de 14 horas para os dados verificados pela equação teórica e os obtidos em campo. Observa-se que a intensidade da chuva em campo foi superior a mínima para levar o avanço da frente de umedecimento até 6,40 metros, estando em conformidade com a equação teórica.

FIGURA 77 - GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE EQUAÇÃO TEÓRICA E DADOS DE CAMPO



FONTE: O AUTOR (2018)

6 CONCLUSÕES

O talude apresentado nesta pesquisa apresenta alta relevância aos estudos relacionados à estabilidade no que condiz ao efeito da infiltração de água no solo. A presença de grandes declividades no local e a posição próxima em relação à rodovia ressaltam a necessidade de se monitorar e avaliar a segurança desse local.

Os dados monitorados pelo pluviógrafo evidenciam a grande dispersão dos acumulados mensais analisados ao longo de toda a série histórica. Acredita-se que essas variações são resultado das variações dos ciclos de chuva ao longo de períodos secos e chuvosos. Recomenda-se a continuidade das análises da série histórica a fim de identificar esses períodos.

As leituras dos tensiômetros e piezômetros demonstraram sofrerem bastante influência de acordo com a estação do ano. Foi possível observar que os tensiômetros mais superficiais apresentam maiores variações nas leituras em períodos de primavera e verão estando esses sensores mais sensíveis a influência da vegetação.

A partir das análises desenvolvidas neste trabalho observou-se que as variações dos valores de poropressões no solo estão diretamente relacionadas à influência das precipitações e à granulometria arenosa. Precipitações que demonstraram um comportamento de grande intensidade horária em lapsos de tempo muito curtos não promoveram variações nos perfis de poropressão, demonstrando que essas chuvas possuem uma tendência ao escoamento ao invés da infiltração e a temperatura.

Medidas de campo demonstraram que as forças de sucção não são necessariamente destruídas após eventos de chuva e os incrementos de poropressão são facilmente dissipados devido à alta permeabilidade do maciço. Como consequência, são necessários sucessivos eventos pluviométricos no decorrer dos dias para manter os excessos gerados de poropressão. Sendo assim, chuvas com menor intensidade, porém agindo em um longo período de tempo possuem uma tendência a infiltração. Desta forma, elas mantêm a alta umidade no maciço e decorrentes maiores valores de poropressão, influenciando diretamente na estabilidade do maciço.

Percebe-se que os instrumentos instalados em menores profundidades possuem respostas imediatas no mesmo dia do evento pluviométrico, entretanto o processo de infiltração em maiores profundidades pode ocasionar variações nos perfis de poropressões dias após o término de um evento pluviométrico.

Nota-se que a partir das análises o processo de infiltração no solo é complexo devido a heterogeneidade do solo, variabilidade espacial e o potencial de interação entre os fluxos internos e de superfície.

As pluviosidades acumuladas *in situ* obtiveram valores superiores as intensidades mínimas obtidos com o método teórico de Pradel e Raad (1993). Entretanto com as leituras de campo, observa-se que algumas simplificações do método não são condizentes com o que é observado em campo, uma delas é considerar o solo acima da frente de umedecimento como sendo saturado, o que não se verifica a partir das leituras dos instrumentos. Desta forma, recomenda-se a criação de novas metodologias de caráter empírico que representem as condições de contorno demonstradas em campo e reduzam as dispersões nos resultados apresentados.

REFERÊNCIAS

AHRENDT, A. (2005) **Movimentos de massa gravitacionais – proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão – SP.** Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

AITCHINSON, G.D. (1961). **Relationship of moisture and effective stress functions in unsaturated soils.** Conf. on Pore Pressure and Suction in Soils. Butterworths, London, pp. 47 -52.

ALMEIDA, F. F. M., CARNEIRO, C.R., 1998. **Origem e evolução da Serra do Mar.** Revista Brasileira de Geociência. 28 (2): 135-150.

AUGUSTO FILHO, O., VIRGILI, J.C. Estabilidade de taludes In: Oliveira, A.M.S.; Brito, S.N.A. (Eds.). **Geologia de Engenharia: ABGE.** Cap.15, p. 15-38, 1998.

Blatz JA, Ferreira NJ and Graham J (2004) **Effects of near-surface environmental conditions on instability of an unsaturated soil slope.** Canadian Geotechnical Journal 41(6): 1111–1126.

Blight, GE; Fourie, AB; Rowe, DB; (1997) **The effect of infiltration on the stability of the slopes of a dry ash dump.** Geotechnique 49(1): 1–13.

BISHOP, A.W. (1959). **The principle of effective stress.** Tecknisk Ukeblad, 106(39): 859-863

BISHOP, A.W.; ALPAN, I; BLIGHT, G.E. & DONALD, I.B (1960). **Factors controlling the shear strength of partly saturated cohesive soils.** Conf. on

BRAND, E.W., 1985, **Predicting the Performance of Residual Soil Slopes.** In: *proceedings of the 11th International Conf. Soil Mech. E Found. Engineering*, v. 5, pp. 2541-2578, São Francisco – E.U.A Univ. of Colorado, Boulder, pp. 503-532.

BRUGGER, P.J., EHRLICH, M. e LACERDA, A.W., 1997, **Moviment, Piezometric Level and Rainfall at Two Natural Soil Slopes.** In: *proceedings of the 2nd Pan-Am. Symposium of the Landslides, 2o COBRAE*, Rio de Janeiro.

CALLE, J. A. C. **Análise de ruptura de talude em solo não saturado.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000.

CAPUTO, H. P, 1987. **Mecânica dos solos e suas aplicações: Mecânica das rochas –Fundações – Obras de Terra.** 6 ed. LTC, Rio de Janeiro.

CARVALHO, J.C.; JUNIOR, G.F.N.G; MACHADO, S.L.; MASCARENHA, M.M.A; FILHO, F.C.S (2015) **Solos não saturados no contato geotécnico.** ABMS, São Paulo, 2015.

Chen Q and Zhang LM (2006) **Three-dimensional analysis of water infiltration into the Gouhou rockfill dam using saturated-unsaturated seepage theory.** Canadian Geotechnical Journal 43(5): 449–461.

Cho SE and Lee SR (2002) **Evaluation of surficial stability for homogeneous slopes considering rainfall characteristics.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 128(9): 756–763.

COMEGNA, L.; DAMIANO, E.; GRECO, R.; GUIDA, A.; OLIVARES, L.; PICARELLI, L. (2016) **Field hydrological monitoring of a sloping shallow pyroclastic.** Canadian Geotechnical Journal 53: 11125-1137.

Collins BD and Znidarcic D (2004) **Stability analyses of rainfall induced landslides.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE 130(4): 362–372.

Cui YJ, Gao YB and Ferber V (2010) **Simulating the water content and temperature changes in an experimental embankment using meteorological data.** Engineering Geology 114(3–4): 456–471.

Cui YJ, Lu YF, Delage P and Riffard M (2005) **Field simulation of in situ water content and temperature changes due to groundatmospheric interactions.** Geotechnique 55(7): 557–567.

CRONEY, D.; COLEMAN, J.D. & BLACK, W.P.M. (1958). **Movement and distribution of water in relation to highway design and performance. Highway no. 40, Washington.**

Dai FC and Lee CF (2001) **Frequency-volume relation and prediction of rainfall-induced landslides.** Engineering Geology 59(3–4): 253–266.

DE CAMPOS, T.M.P.; MONCADA, M.P.H.; VELLOSO, R.Q.; AMARAL, C.P.; VARGAS JR., E.A. (2008). **Retroanálise de escorregamento do túnel Rebouças.** XII Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Porto de Galinhas, CD-ROM.

DE CAMPOS, T.M.P.; MONCADA, M.P.H.; VELLOSO, R.Q.; AMARAL, C.P.; (2005) **Avaliação preliminar das causas de ruptura de uma encosta em nova Friburgo, RJ.** IV Conferência Brasileira sobre estabilidade de encostas, v. II, pp. 721-732.

D'ORSI, R. N., **Correlação entre pluviometria e escorregamentos no trecho da Serra dos Órgãos da Rodovia Federal BR-116 RJ** (Estrada Rio-Teresópolis). Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2011.

DUNNICLIFF, J. **Geotechnical instrumentation for monitoring field performance.** John Wiley & Sons, Inc. USA 1988.

DGSI. **Guide to Geotechnical Instrumentation**. Durham Geo Slope Indicator. 2004.

ENOKI, M.; KOKUBU, A. A.; IKEDA, Y. (1999). **Infiltration of rainwater and slope failure**. In: GRIFFITHS, STOKES & THOMAS eds. *Landslides*. Balkema, Rotterdam. P. 27-35

EPA – United States Environmental Protection Agency (1998). **Estimation of infiltration rate in the vadose zone: compilation of simple mathematical models**. In: RAVI, V.; WILLIAMS, J.R.; ed., v. 1, 84 p.

ERING, P.; BABU, G.L.; (2016) **Probabilistic back analysis of rainfall induced landslide – a case study of Malin landslide, India**. Engineering Geology 208. 154-164.

ESCÁRIO, V. & SÁEZ, J. (1986). **The shear strength of partly saturated soils**. Geotechnique, 36 (3): 453-456.

ESCÁRIO, V. & SÁEZ, J. (1987). **Shear strength of partly saturated soils versus suction**. 6th Int. Conf. on Expansive Soils, New Delhi, Índia. Pp. 602-605.

FERC – Federal Energy Regulatory Commission. **Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects**. Washington DC, 2008.

FREDLUND, D.G.; XING, A.; HUANG, S. (1994). **Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve**. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 31, p. 533-546.

Finlay PJ, Fell R and Maguire PK (1997) **The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall**. *Canadian Geotechnical Journal* 34(6): 811–824.

FIORI, A. P., 2011. **Avaliação de estabilidade e do desempenho de sistemas de proteção de taludes rodoviários em uma encosta litorânea**. II Relatório interno de pesquisa. Recurso para desenvolvimento Tecnológico – RDT. Projeto 03. Curitiba – PR.

FIORI, A. P., 2012. **Avaliação de estabilidade e do desempenho de sistemas de proteção de taludes rodoviários em uma encosta litorânea**. V Relatório interno de pesquisa. Recurso para desenvolvimento Tecnológico – RDT. Projeto 03. Curitiba – PR.

FUTAI, M. M. **Estudo teórico-experimental do comportamento de solos tropicais não saturados: Aplicação a um caso de voçorocamento**. Tese (Doutorado). COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. Stress state variables for unsaturated soils. **Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE**, vol.103, n.5, p.447- 466. 1977.

FREYBERG, D.L.; REEDER, J.W.; FRANZINI, J.B.; REMSON, I. (1980). **Aplication of the Green-Ampt Model to infiltration under time-dependent surface water depths**. *Water Resources Research*, v. 16(3), p. 517-528.

GOKON. Products. Geokon, Incorporated. Disponível em <<http://geokon.com/products/>>. Acesso em: Abril/2017.

Gasmo J, Hritzuk KJ, Rahardjo H and Leong EC (1999) **Instrumentation of an unsaturated residual soil slope**. *Geotechnical Testing Journal* 22(2): 134–143.

Gasmo JM, Rahardjo H and Leong EC (2000) **Infiltration effects on stability of a residual soil slope**. *Computers and Geotechnics* 26(2): 145–165.

Geo-slope Ltd (2001a) **Seep/W for Finite Element Seepage Analysis: User's Guide**. Geo-Slope Ltd, Calgary, Canada.

GEO-SLOPE, International, 2012. **GeoStudio**. v.6, Calgary – Canadá.

GEORIO **Manual Técnico de Encostas**, Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, 2014.Vol. I. 518p.

GERSCOVICH, D. M. S., 2012. **Estabilidade de taludes**. Oficina de Textos: São Paulo– SP.

GERSCOVICH, D.M.S; DE CAMPOS, T.M.P; VARGAS JR, E. (2011). **Back analyses of a landslide in residual soil slope in Rio de Janeiro, Brazil, Brazil**.*Soil and Rocks*, 14(2): 139-149.

GERSCOVICH, D.M.S; DE CAMPOS, T.M.P; VARGAS JR, E. (2008). **A retroanálise da ruptura de encosta no Rio de Janeiro**.XI Congresso Nacional de Geotecnia, Coimbra. V.III pp 115-122

GERSCOVICH, D.M.S; DE CAMPOS, T.M.P; VARGAS JR, E. (2006). **A on the evaluation of unsaturated flow in residual soil slope in Rio de Janeiro, Brazil**. *Engineering Geology* 88:23-40.

GONZÁLEZ, A. A. M., 2013. **Estudo de série de leituras obtidas através do monitoramento da instrumentação geotécnica implantada em uma encosta litorânea**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Construção Civil.Curitiba - PR.

GONZÁLEZ, A. A.M.; PASSINI, L.B.; KORMANN, A.C.M; 2017. **Rainfall Effects on Pore Pressure changes in a costal slope os the Serra do Mar in Santa Catatina**. *Soil and Rocks*, São Paulo, 40(3): 263-278.

GOOGLE, 2017. **Programa Google Earth**.

GUIDICINI, Guido; NIEBLE, Carlos Manoel. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo: Editora Universidade de São Paulo, 1984.

GOVI, M., SORZANA, P. F. (1980) – **Landslide Susceptibility as Funtion of Critical Rainfall Amount in Piedmont Basins (North-Western Italy)**. *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, v. 14, pp. 43-61.

Green WH and Ampt CA (1911) **Studies on soil physics: flow of air and water through soils**. *Journal of Agricultural Science* 4: 1–24.

HILLEL, D. (1982) **Introduction to soil physics**. Academic Press. Nova York.

Huang CC, Lo CL, Jang JS and Hwu LK (2008) **Internal soil moisture response to rainfall-induced slope failures and debris discharge**. *Engineering Geology* 101(3–4): 134–145.

Huat BBK, Ali FH and Low TH (2006) **Water infiltration characteristics of unsaturated soil slope and its effect on suction and stability**. *Geotechnical and Geological Engineering* 24(5): 1293–1306.

IDE, F.S., 2005, **Deslizamento, Meteorologia e Precipitação: uma Proposta de método de investigação para Prevenção e Monitoramento de Riscos, Aplicado em Campinas/SP**” M.Sc., dissertação – Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) do Estado de São Paulo, S.P..

IGNATIUS, S.G.; TOGNON, A.A.; SAAD, A.M. & CARVALHO, C.S. (1991). **Ensaio geotécnicos em solos não-saturados no Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, SP**, anais do Simpósio Sobre Solos Não-Saturados, UnB, Brasília, pp. 50-70.

Iverson RM (2000) **Landslide triggering by rain infiltration**. *Water Resources Research* 36(7): 1897–1910.

JENNINGS, J.E.B. (1961). A revised effective stress law for use in the prediction of the behavior of unsaturated soils. *Conf. on Pore Pressure and Suction* in pp. 26-30.

Johnson Ka and Sitar N (1990) **Hydrologic conditions leading to debris-flow initiation**. *Canadian Geotechnical Journal* 27(6): 789–801.

Kim YK and Lee SR (2010) **Field infiltration characteristics of natural rainfall in compacted roadside slopes**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 136(1): 248–252.

Kisch M (1959) **The theory of seepage from clay-blanketed reservoirs**. *Geotechnique* 9(1): 9–21.

Kormann, A.C.M.; Sestrem, L.P. & Asakawa, S. (2011). **Avaliações de estabilidade e do desempenho de sistemas de proteção de taludes rodoviários em uma encosta litorânea instrumentada**. In: *Anais do VI*

Workshop Desenvolvimento Tecnológico nas Concessões Rodoviárias, Brasília, pp. 8-9.

JOLY, N.H.; KORMANN; A.C.M; SESTREM, L.P.; FARO, V.P.; GONZÁLEZ ACEVEDO, A.M. **análise de risco de escorregamentos com base no índice acumulado de pluviosidade: um estudo de caso na serra do mar brasileira.** In: 15th Congresso Nacional de Geotecnia, Porto, 2016.

JOLY, N.H.; KORMANN; A.C.M; SESTREM, L.P.; FARO, V.P.; GONZÁLEZ ACEVEDO, A.M. **Análise da influência da evapotranspiração em uma encosta litorânea rodoviária.** In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte, 2016.

LAZARIM, T. P., 2012. **Caracterização e retroanálises da ruptura de um talude rodoviário – BR-101, Santa Catarina.** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR.

LEROUIEL, S. (2001). **Natural slopes and cuts: movement and failure mechanisms.** *Géotechnique*, v. 51, n. 3, p. 197-243.

LIBARDI, P.L. (2001), **Dinâmica da água no solo.** ESALQ/USP. Piracicaba-SP. 497 p., ed. 2

Li AG, Yue ZQ, Tham LG, Lee CF and Law KT (2005) **Field monitored variations of soil moisture and matric suction in a saprolite slope.** *Canadian Geotechnical Journal* 42(1): 13–26.

Li JH and Zhang LM (2010) **Geometric parameters and REV of a crack network in soil.** *Computers and Geotechnics* 37(4): 466–475.

Li JH, Zhang LM, Wang Y and Fredlund DG (2009) **Permeability tensor and representative elementary volume of saturated cracked soil.** *Canadian Geotechnical Journal* 46(8): 928– 942.

Li JH, Zhang LM and Kwong BCP (2011) **Field permeability at shallow depth in a compacted fill. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering** 164(3): 211–221.

Li X, Zhang LM and Fredlund DG (2009) **Wetting front advancing column test for measuring unsaturated hydraulic conductivity.** *Canadian Geotechnical Journal* 46(12): 1431–1445.

LIM, T. T.. RAHARDJO, H., CHANG, M.F., FREDLUND, D.G. (1996) **Effect of rainfall on matric suctions in a residual soil slope.** *Canadian Geotechnical Journal*, v. 33, p. 618-628.

LUMB, P., 1975, **Slope Failures in Hong Kong.** *Quarterly Journal of Engineering Geology*, v. 8, pp. 3165.

MARANGON, M. **Tópicos em geotecnia e Obras de terra**. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2004. Material didático.

MARINHO, F.A.M, **Medição de sucção em solos**. Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados - Solos não saturados, vol. 2, pp.373 – 397. Rio de Janeiro. 1997.

MARINHO, F.A.M.; TAKE, A. & TARANTINO, A. (2009). **techniques for suction measurement**. Geotechnical and Geological Engineering, 26(6):615-631.

MASSAD, Façal. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. São Paulo: editora Ofinina de Textos, 2ª edição, 2010.

Mein RG and Larson CL (1973) **Modelling infiltration during a steady rain**. Water Resources Research 9(2): 384–394.

MIYAZAKI, T. (1993) **Water Flow in soils**. New York, Marcelli Dekker, Inc.

MONTGOMERY, D. R., DIETRICH, W.E.; TORRES, R.; ANDERSON, S. P.; HEFFNER, J. T.; LOAGUES, K. (1997). **Hydrologic responde of a steep unchanneied valley to natural and applied rainfall**. Water Resources Research, v. 33, p. 91-109.

Ng CWW, Shi Q (1998) **Influence of rainfall intensity and duration on slope stability in unsaturated soils**. Quarterly Journal of Engineering Geology 31(2): 105–113.

Ng CWW, Shi Q (1998b) **Numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage**. Computers and Geotechnics 22(1): 1–28.

Ng CWW, Wang B, Tung YK (2001) **Three-dimensional numerical investigations of groundwater responses in an unsaturated slope subjected to various rainfall patterns**. Canadian Geotechnical Journal 38(5): 1049–1062.

Ng CWW, Zhan LT, Bao CG, Fredlund DG and Gong BW (2003) **Performance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration**. Geotechnique 53(2): 143–157.

OLIVEIRA, R. M., **Desenvolvimento de elementos sensores de cerâmicas porosas de ZrO2-TiO2 para aplicação no monitoramento do conteúdo de água em solos**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 2010

PEDROSA, M. G. A. **Análise de correlações entre pluviometria e deslizamentos de taludes**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1994.

PRADEL, D., RAAD, G. **Effect of permeability on superficial stability of homogeneous slopes**. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE 119 (2), 315-332, 1993.

PRETTO, J., H. F. **Análise de tensão x deformação de uma encosta natural. Estudo de caso: Morro do Boi – Balneário Camboriú**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil – PPGECC - Geotecnia, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná – UFPR. 2014.

PUN WK, WONG ACW AND PANG PLR (1999) **Review of Landslip Warning Criteria**. Geotechnical Engineering Office, The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, Special Project Report SPR 4/99.

RAHARDJO, H., LEONG, E. C., REZAUR, R. B., **Effect of antecedent rainfall on pore-water pressure distribution characteristics in residual soil slopes under tropical rainfall**. Hydrological Process 22. 506-523 p. 2008

RAHARDJO, H., LEONG, E. C., REZAUR, R. B., **The effect of antecedent rainfall on slope landslides**. Geotechnical and Geological Engineering 19. 371-379 p. © Kluwer Academic Publishers. 2001.

RAHARDJO H, LIM TT, CHANG MF AND FREDLUND DG (1995) **Shear strength characteristics of a residual soil**. Canadian Geotechnical Journal 32(1): 60–77.

RAHARDJO H, ONG TH, REZAUR RB AND LEONG EC (2007) **Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 133(12): 1532–1543.

RAHARDJO H, LEONG E C, REZAUR RB (2008) **Effect of antecedent rainfall on pore-water pressure distribution characteristics in residual soil slopes under tropical rainfall**. Hydrological Process 22: 506 - 523.

RAHIMI A, RAHARDJO H AND LEONG EC (2010) **Effect of hydraulic properties of soil on rainfall-induced slope failure**. Engineering Geology 114(3–4): 135–143.

ROHM, S.A. AND VILAR, O.M. (1995). **Shear strength of an unsaturated sandy soil**. *Unsaturated Soils*, ed. Alonso and Delage., Proc. 1st Int. Conf. On Vol. 1, pp. 189-193.

ROBINSON, J. D.; VAHEDIFARD, F; AGHAKOUCHAK, A.;. (2016) **Rainfall Triggered slope instabilities under a changing climates: comparative study using historical and projected precipitation extremes**. Canadian Geotechnical Journal 53: 11125-11137.

SANTOS, E. F. (2006). **Estudo Comparativo de Diferentes Aplicadas aos Solos Tropicais**. Dissertação de Mestrado. Escola Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 145 pp.

Sako K, Kitamura R and Fukagawa R (2006) **Study of slope failure due to rainfall: a comparison between experiment and simulation**. In Unsaturated Soils 2006 (Miller GA, Zapata CE, Houston SL and Fredlund DG (eds)). American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA, Geotechnical Special Publication No. 147, pp. 2324–2335.

SALES, M.M.; CAMPOS, L.E.P; FERREIRA, S.R.M, CRUZ, J.Q.; (2012) **Risco em obras devido a infiltrações**. CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITARANA, JR, CARVALHO, E.T.L (orgs.) Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicada a solos tropicais. Universidade de Brasília, pp. 445-456.

SESTREM, L. P., 2012. **Concepção e implantação de um plano de instrumentação para avaliação das condicionantes geotécnicas de uma encosta litorânea**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Curitiba - PR.

SESTREM, L.P.; KORMANN, A.C.M; MARINHO, F.A.M; PRETTO, J.H.F (2015) **Precipitation influence on the distribution of porepressure and suction on a coastal hillside**. Soil And rocks, V.38, N.1.

SILLER, W.S.; FREDLUND, D.G. (2001) **Statistical assessment of soil water characteristics curve models for geotechnical engineering**. Canadian Geotechnical Journal, v. 38, p. 1297-1313.

SILVA JR., A.C. (2010). **Avaliação das flutuações sazonais de umidade e sucção em um perfil de solo tropical**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, UFG, Goiania, GO, 137 p.

Sun HW, Wong HN and Ho KKS (1998) **Analysis of infiltration in unsaturated ground**. In **Slope Engineering in Hong Kong** (Li KS, Kay JN and Ho KKS (eds)). Balkema, Rotterdam, the Netherlands, pp. 101–109.

SoilVision System Ltd (2001) **SVFlux User's Manual**. SoilVision System Ltd, Saskatoon, Canada.

SOILMOISTURE – Equipment Corp. Tensiometers. Disponível em: <<http://www.soilmoisture.com/PDF%20Files/tensiom.pdf>>. Acesso em: Abril/2017.

TAYLOR, D.W. (1948). **Fundamentals of Soil Mechanics**, John Wiley & Sons, New York, 700p.

Tami D, Rahardjo H and Leong EC (2004) **Effects of hysteresis on steady-state infiltration in unsaturated slopes**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 130(9): 956–967.

TERZAGHI, K. (1936). **The shear resistance of saturated soils**. Proc. 1st Int. Conf. Soil Mech. Found. Engr., Cambridge, MA, Vol.1: 54-56.

Tohari A, Nishigaki M and Komatsu M (2007) **Laboratory rainfall-induced slope failure with moisture content measurement.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 133(5): 575–587.

Trandafir AC, Sidle RC, Gomi T and Kamai T (2008) **Monitored and simulated variations in matric suction during rainfall in a residual soil slope.** Environmental Geology 55(5): 951–961.

Tsaparas I, Rahardjo H, Toll DG and Leong EC (2003) **Infiltration characteristics of two instrumented residual soil slopes.** Canadian Geotechnical Journal 40(5): 1012–1032.

Tu XB, Kwong AKL, Dai FC, Tham LG and Min H (2009) **Field monitoring of rainfall infiltration in a loess slope and analysis of failure mechanism of rainfall-induced landslides.** Engineering Geology 105(1–2): 134–150.

VANAPALLI, D.G.; FREDLUND, D.G.; PUFAHL, D.E. & CLIFTON, A.W. (1996). **Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction.** Can. Geotech J.33: 379-392.

VAN ONSELEN, C.C.; (2016) **retroanálise computacional de ruptura havida durante chuvas intensas em talude sito à br 116/RJ km 76,4.** dissertação (mestrado). universidade federal do rio de janeiro, rio de janeiro, 2016.

VICTORINO, M. M. **Influência da chuva nas poropressões e estabilidade dos taludes rodoviários de um trecho da BR 376 na Serra do Mar paranaense.** Dissertação (Mestrado), PPGECC, Curitiba, 2015.

WOLLE, C. M.; CARVALHO, C.S., 1988. **Deslizamentos em encostas na Serra do Mar - Brasil.** Revista Solos e Rochas: São Paulo, 12: 27-36

Xue J and Gavin K (2008) **Effect of rainfall intensity on infiltration into partly saturated slopes.** Geotechnical and Geological Engineering 26(2): 199–209.

Zhan LT and Ng CWW (2001) **Analytical analysis of rainfall infiltration mechanism in unsaturated soils.** International Journal of Geomechanics 4(4): 273–284.

Zhan TLT, Ng CWW and Fredlund DG (2007) **Field study of rainfall infiltration into a grassed unsaturated expansive soil slope.** Canadian Geotechnical Journal 44(4): 392–408.

Zhang LL, Fredlund DG, Zhang LM and Tang WH (2004) **Numerical study of soil conditions under which matric suction can be maintained.** Canadian Geotechnical Journal 41(4): 569–582.

Zhang LM and Li X (2010) **Micro-porosity structure of coarse granular soils.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 136(10): 1425–1436.